Bertrand Goldschmidt

L´AVENTURE ATOMIQUE

SES ASPECTS
POLITIQUES ET TECHNIQUES

LES GRANDES ÉTUDES CONTEMPORAINES
Fayard

Bertrand Goldschmidt

L'AVENTURE ATOMIQUE

LES GRANDES ÉTUDES CONTEMPORAINES

Fayard

L'Aventure atomique, étroitement liée à l'histoire des vingt dernières années, retrace la ronde des images du kaléidoscope des questions atomiques sous leurs multiples aspects scientifiques, industriels, économiques, militaires et politiques. C'est le premier ouvrage à la portée d'un lecteur non spécialisé qui dépeint une fresque historique et internationale de l'ensemble du problème atomique, animée par des souvenirs de l'auteur, un des pionniers de cette technique nouvelle.

Le récit commence avec la découverte du radium et sur les quarante années de recherches scientifiques qui aboutissent à la découverte de la fission de l'uranium, en 1939. Ainsi a été rendue possible l'étonnante entreprise interalliée de la fabrication de la bombe atomique, avec ses équipes scientifiques géantes et son premier cortège de problèmes politiques dont celui de la décision d'utilisation de la bombe souligne la nouvelle responsabilité morale et politique du savant.

Les années qui suivent la fin de la guerre sont caractérisées par la politique anglo-américaine du secret dont l'insuccès sera prouvé par les réalisations soviétiques, les affaires d'espionnage et la course à la bombe à hydrogène. Celles-ci entraînent la levée du secret atomique en 1954 et la mise sur pied d'une politique nouvelle, celle de l'aide contrôlée. Les années suivantes, de 1955 à 1958, sont caractérisées par une véritable euphorie dans les programmes nationaux et dans la création d'organismes internationaux, mais dès 1959 surviennent des années plus sobres de réajustement qui se prolongent jusqu'à ce jour.

L'ouvrage se poursuit par une description du développement actuel des applications civiles et militaires souvent imbriquées ; il s'achève sur un aperçu du programme français et une ébauche de prévision de l'avenir. L'énergie atomique, avec son potentiel de bien et de mal, est susceptible d'amener d'ici dix ou vingt ans une révolution dans la production d'énergie mondiale, mais elle a dès maintenant apporté un bouleversement total dans la science militaire et la politique internationale avec l'arme et le sous-marin nucléaires porteurs de la menace de la guerre anonyme.

L'affaire est capitale et le but de l'ouvrage est d'en faire mieux comprendre, et dans leurs justes proportions, les dangers et les impératifs, et aussi les bienfaits qui seront la récompense d'une humanité plus raisonnable et plus unifiée qui, devant le défi atomique, aura su se débarrasser du spectre de la guerre.

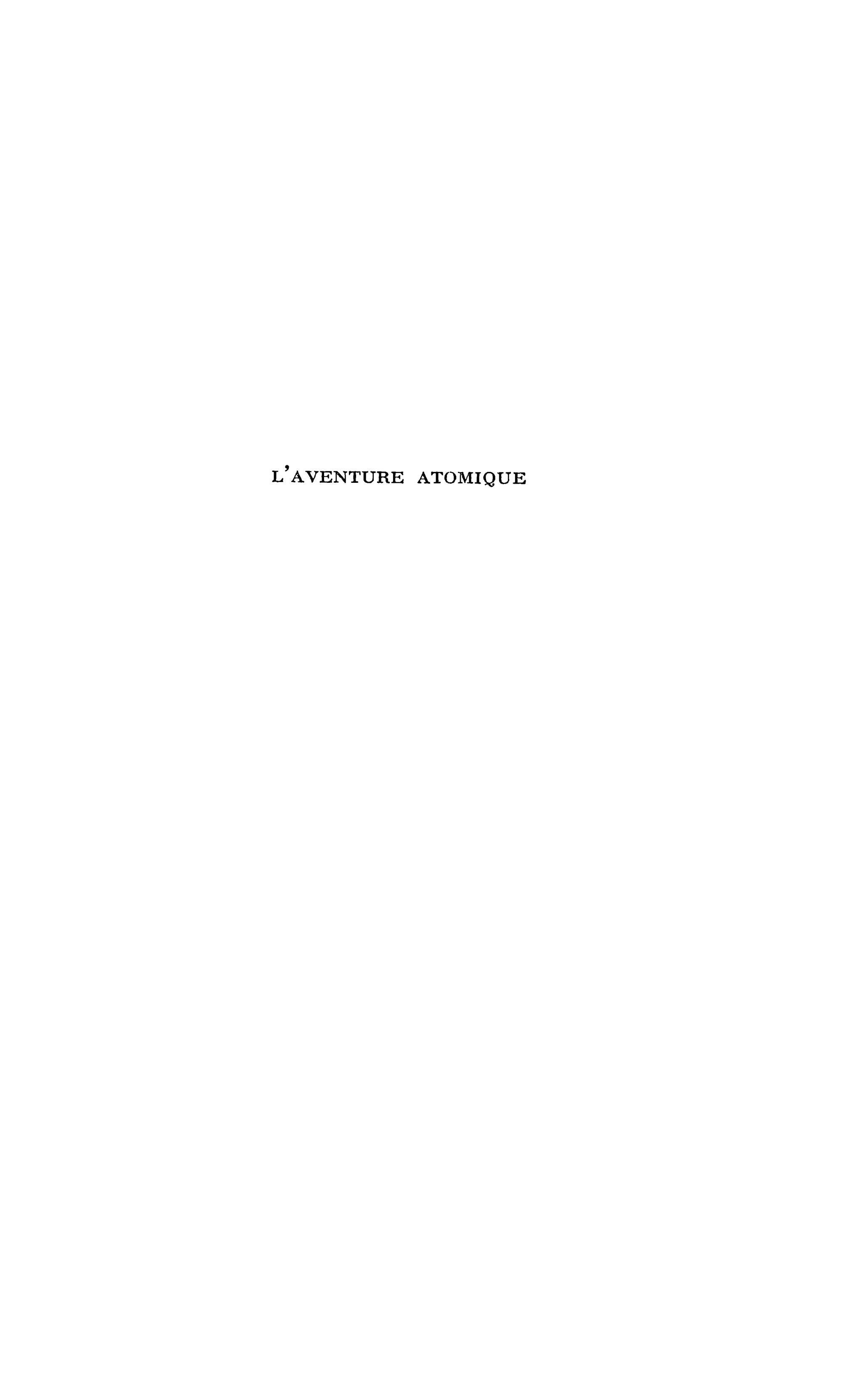
Bertrand Goldschmidt, un des pionniers français de l'énergie atomique, est né à Paris en 1912. Ingénieur de l'Ecole de Physique et de Chimie, docteur ès Sciences, il a travaillé au Laboratoire Curie de 1934 à 1940. Pendant la guerre, détaché par les Forces Françaises Libres, il a participé aux recherches atomiques, en particulier sur le plutonium, aux Etats-Unis, en 1942, et au Canada, de 1943 à 1946. Un des dirigeants du Commissariat à l'Energie atomique depuis sa fondation, il a été responsable de la chimie jusqu'en 1959 et en est aujourd'hui le Directeur des Relations extérieures et des Programmes. Il est aussi professeur à l'Institut d'Etudes politiques et représentant de la France auprès de l'Agence internationale de l'énergie atomique.

204.020 PRIX : 12 NF + T.L. 12,34 NF T.L.I. IMPRIMÉ EN FRANCE

BERTRAND GOLDSCHMIDT

L'AVENTURE ATOMIQUE

FAYARD



L'AVENTURE ATOMIQUE

Bertrand Goldschmidt

L'AVENTURE ATOMIQUE

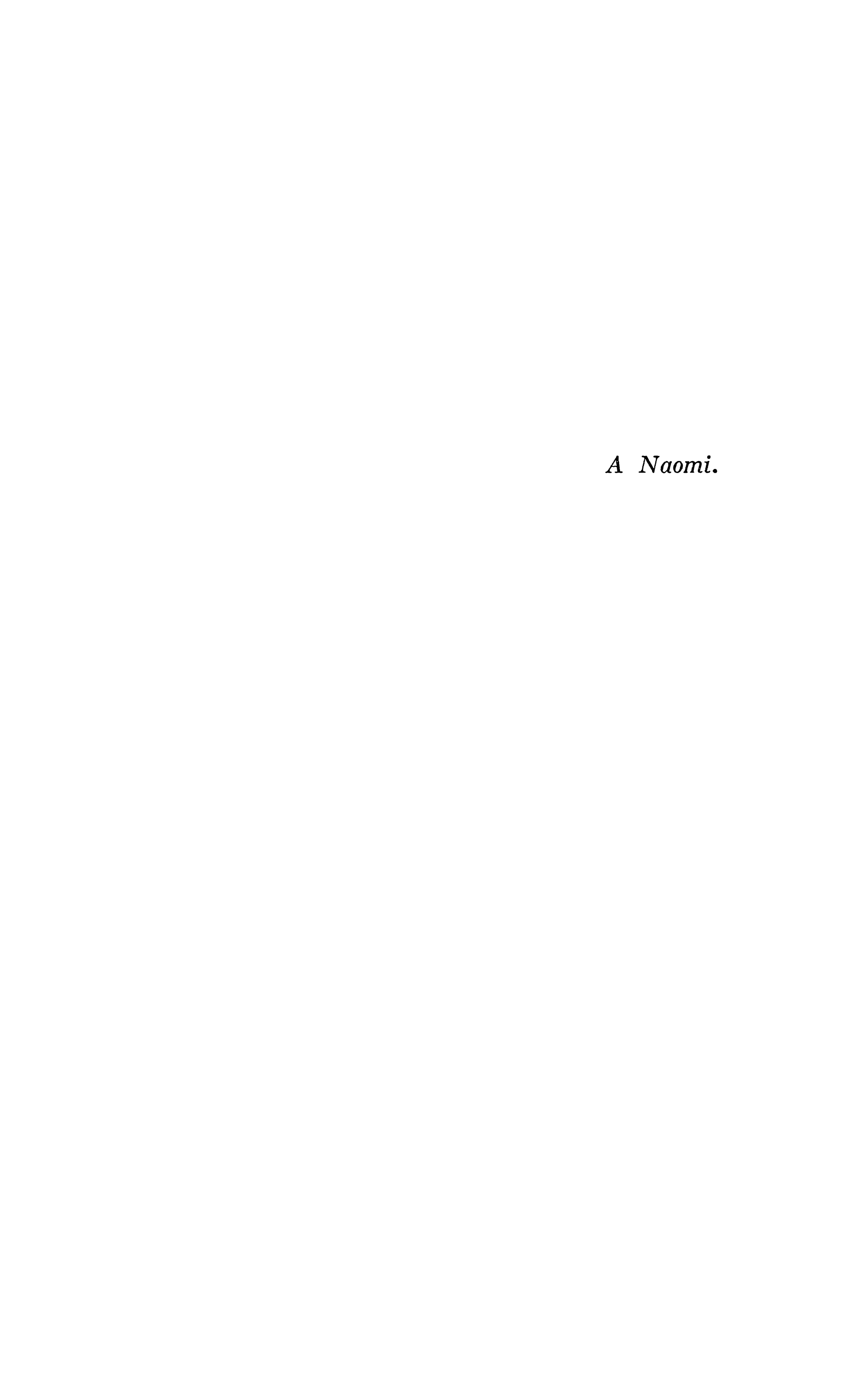
SES ASPECTS
POLITIQUES ET TECHNIQUES

LES GRANDES ÉTUDES CONTEMPORAINES

Fayard

Il a été tiré de cet ouvrage :

50 EXEMPLAIRES SUR PAPIER ALFA
NUMÉROTÉS DE 1 à 50
ET 50 EXEMPLAIRES HORS COMMERCE
SUR PAPIER ALFA NUMÉROTÉS H.C. 1 à H.C. 50



A Naomi.

Avant-propos.

Le 16 juillet 1945, dans l'État du Nouveau-Mexique, au sud-ouest des États-Unis, une femme conduisant son auto arriva dans un village à cinq heures du matin, s'arrêta et se mit à frapper aux portes pour réveiller les habitants : « Il faut que je vous raconte ce que j'ai vu, disait-elle, ce n'est pas croyable. Je viens de voir le soleil se lever puis immédiatement se recoucher. »

Les agents de la police secrète présents, comme dans chaque ville voisine, pour surveiller les réactions de la population, eurent toutes les peines du monde à la calmer. Elle venait en effet d'assister, à une distance de près de cent kilomètres, à la première explosion atomique, véritable création d'un morceau d'étoile, qui fit fondre le sable du désert sur une surface de près d'un kilomètre carré.

Quelques jours plus tard se tenait à Potsdam la Conférence au sommet qui consacra la victoire des Alliés sur l'Allemagne. Truman et Attlee annoncèrent alors à Staline qu'ils avaient en leur possession une arme nouvelle d'une portée effroyable qui, à temps aux mains des Allemands, aurait permis à ceux-ci de gagner la guerre et de mettre le monde sous l'esclavage nazi.

Le 6 août 1945, Hiroshima est détruite par une seule bombe lancée d'un seul avion; deux jours plus tard, trois mois exactement après la fin de la guerre avec l'Allemagne, et conformément à l'engagement pris à la Conférence de Téhéran, l'Union Soviétique déclare la guerre au Japon et pénètre en Mandchourie. Le lendemain, Nagasaki est détruite à son tour par la dernière bombe atomique

alors en possession des Américains, et enfin, le 14 août, le Japon se rend sans conditions.

En six ans, une découverte de science pure, la fission du noyau de l'atome d'uranium, était passée du laboratoire aux chancelleries du monde entier pour devenir le facteur politique le plus important de l'heure. Le fait est fondamental. L'homme, pour la première fois de son évolution, dans cette marche sans fin pour utiliser les forces de la nature à façonner le monde à son gré, a mis la main sur un moyen de destruction tel que le pays qui le possède peut en quelques instants supprimer la vie comme la civilisation sur une large partie du globe.

La technique moderne créera peut-être d'ici à la fin du siècle à venir d'autres moyens extraordinaires de destruction dont l'arme atomique n'est que le premier; mais étant le premier, c'est à son sujet que l'homme devra passer son examen de raison ou de folie.

Cette épreuve est d'autant plus inévitable que l'uranium, abondant dans la nature, est à l'origine d'une nouvelle source d'énergie utilisable, extraordinairement concentrée, aujourd'hui à l'essai, demain peut-être indispensable.

En effet, la fission de l'uranium arrive à temps pour servir d'appoint à une civilisation assoiffée d'énergie dont il est à craindre que les ressources conventionnelles ne pourront longtemps suffire à satisfaire à la fois aux besoins sans cesse croissants des pays industrialisés et à la transformation des pays en voie de développement.

De plus, en cette matière, les domaines civil et militaire sont étroitement imbriqués, car c'est à la suite d'une longue série de réalisations industrielles communes que l'on bifurque vers l'un ou l'autre, et ce sont les mêmes substances qui peuvent servir indistinctement d'explosifs ou de combustibles nucléaires.

Ainsi donc, le développement industriel de l'énergie atomique ne fera que rendre plus nécessaire la solution du problème politique posé par l'existence des armes de destruction en masse, solution qui doit aboutir à la formation d'un monde uni. Dans cette deuxième moitié du XXe siècle où le temps semble se contracter devant la rapidité du progrès technique et des bouleversements

politiques, il faut que cette unification se fasse par une évolution normale des relations entre nations et non pas par la soumission à un pays qui les menacerait de destruction totale ou à la suite du chaos qui suivrait une guerre atomique.

Mais le danger n'a jamais empêché l'homme d'aller de l'avant et, malgré le redoutable défi, il s'est déjà engagé résolument dans l'aventure atomique.

Cette aventure, à laquelle j'ai participé depuis ses débuts, est étroitement liée à l'histoire de ces vingt dernières années. J'ai essayé d'en retracer le déroulement, et je désire exprimer ici toute ma reconnaissance aux amis et en particulier au professeur Louis Bugnard, qui m'ont encouragé à écrire les pages qui suivent, et souvent assisté dans leur rédaction. Ces pages cherchent, sans trop pénétrer dans le domaine technique, à dépeindre jusqu'à ce jour, et sous ses multiples aspects, la constante évolution du problème dont dépend le sort de notre civilisation.

1.

De la radioactivité à la fission[1].

1896-1939.

La radioactivité naturelle et la structure de l'atome.

Le rideau se lève sur un jour parisien sans soleil de l'hiver 1896; le personnage central de notre aventure — l'uranium — entre en scène. Henri Becquerel, professeur de physique au Muséum d'Histoire naturelle, va prouver, contrairement à sa première hypothèse, que l'absence de lumière solaire ne supprime pas l'émission par les sels d'uranium d'un rayonnement mystérieux qu'il a décelé depuis peu, qui voile la plaque photographique à travers un papier noir, et ressemble ainsi aux rayons X découverts l'année précédente par le physicien allemand Wilhelm Rœntgen.

Le début de l'année 1898 voit Maria Sklodowska-Curie, âgée de trente ans, s'attaquer pour son premier travail de recherche à l'étude quantitative de ce rayonnement; elle vérifie d'abord que l'intensité de l'émission pour divers composés d'uranium est en rapport direct avec leur teneur en cet élément, mais quand elle passe aux minerais uranifères, grande est sa surprise de se trouver en présence d'une activité plusieurs fois supérieure à celle que l'on aurait pu attendre de l'uranium pur.

C'est alors, et elle se plaisait souvent à le rappeler, qu'elle vint demander aide à son mari Pierre Curie, physicien déjà réputé, et que celui-ci abandonna avec mauvaise grâce ses travaux en cours sur le magnétisme pour, espérait-il, éclaircir en quelque quinze jours l'étude du

1. Ce premier chapitre, le plus technique de l'ouvrage, comporte un très bref rappel des principales données de base de la science atomique.

phénomène que sa jeune femme venait de découvrir dans un modeste laboratoire improvisé dans un hangar de l'École de Physique et de Chimie de Paris.

Les dés étaient jetés, la porte de l'alchimie leur était ouverte, et la clef de l'étude de la structure de la matière était à leur portée; ils allaient en franchir les premières étapes fondamentales sur une longue route où nous cheminons encore aujourd'hui.

Les Curie furent rapidement convaincus qu'ils se trouvaient en présence de quantités infimes d'éléments nouveaux, émetteurs de rayonnements beaucoup plus puissants que l'uranium. Avant la fin de l'année 1898, ils décelèrent, sans l'isoler, un premier élément inconnu qu'ils nommèrent le polonium, et un deuxième, le radium. Puis, aidés par le chimiste Gustave Bémont, et après quatre ans de travail exténuant sur une tonne de résidus de pechblende, minerais d'uranium provenant de Bohême, ils aboutirent en 1902 au triomphal isolement du premier décigramme de radium.

La gloire vint aux Curie, malheureusement sans les moyens de travail qu'ils réclamaient. Ce n'est qu'après la mort prématurée de Pierre Curie en 1906 qu'un véritable laboratoire, l'Institut du Radium, fut créé pour Mme Curie auprès de la Faculté des Sciences de Paris.

Ainsi, conformément à une caractéristique de l'évolution de la science au début du xxe siècle, les travaux qui aboutiront à la découverte de la fission, commencés par des savants isolés disposant de moyens rudimentaires, vont être poursuivis dans des laboratoires universitaires par de petites équipes de physiciens et de chimistes groupés autour d'un chef d'école et travaillant principalement dans les grands centres intellectuels européens de Paris, de Cambridge, de Berlin, et plus tard, de Copenhague, de Rome et de Göttingen.

Successivement, de nombreux nouveaux corps radioactifs naturels sont découverts et le phénomène de radioactivité est expliqué : il correspond à une manifestation d'instabilité de certains atomes se traduisant par l'émission d'un « rayon », c'est-à-dire l'éjection à grande vitesse d'une particule, grain de matière ou d'électricité, avec formation d'un atome nouveau de nature différente du

premier et, par conséquent, transmutation d'un élément en un autre.

Le dogme de Lavoisier, celui de la conservation des éléments, un des piliers sur lesquels s'est développée la chimie du XIXe siècle, se trouvait ainsi détruit. Un deuxième dogme, celui de la conservation de la masse, allait aussi disparaître à la même époque, à la suite des travaux d'Albert Einstein concluant à l'équivalence de la masse et de l'énergie.

Vers 1910, la pointe avancée des travaux se déplaça vers l'Angleterre à Manchester, puis à la grande école du Cavendish Laboratory à Cambridge, sous la direction de Sir Ernest Rutherford qui allait devenir le chef de file de ces recherches pendant près d'un quart de siècle. Son œuvre et celle de son plus illustre élève Niels Bohr allaient, en poursuivant l'étude des particules émises par les atomes radioactifs, aboutir à la description du modèle planétaire de la structure de l'atome. Celui-ci est constitué d'un nuage de grains d'électricité négative ou électrons, gravitant autour d'un noyau central extrêmement compact contenant la matière sous forme de deux sortes de particules de même masse, les unes chargées d'électricité positive, les protons, les autres sans charge électrique, les neutrons. La charge électrique du proton est égale et de signe opposé à celle de l'électron, et l'ensemble de l'atome est neutre, car le nombre de protons est le même que celui des électrons périphériques.

La classification des éléments par masse croissante et par analogie chimique proposée par le savant russe Dimitri Mendéléev dès 1875 se trouva alors confirmée : le facteur caractéristique, qui conditionne les propriétés physico-chimiques d'un élément donné, est le nombre des électrons périphériques de ses atomes égal à celui des protons présents dans les noyaux de ces mêmes atomes; ce nombre correspond au rang de l'élément dans la classification qui va des éléments les plus légers, l'hydrogène et l'hélium, aux plus lourds trouvés sur terre, le thorium et l'uranium.

A la veille de la Première Guerre mondiale, une nouvelle notion importante, celle d'isotope, vint compléter la précédente : si pour un élément donné, le nombre total de protons présents dans les noyaux de ses atomes est cons-

tant et caractéristique, il n'en est souvent pas de même pour le nombre de neutrons qui peut varier de quelques unités.

Les atomes d'un élément qui ne diffèrent que par le nombre des neutrons contenus dans leur noyau sont nommés des isotopes [2] : ce sont de véritables jumeaux en raison de la quasi-identité de leurs propriétés physico-chimiques qui rend leur séparation extrêmement difficile, mais leurs caractères nucléaires sont très différents, et ce fait jouera un rôle de premier plan dans l'affaire atomique.

Ainsi notre principal personnage, l'uranium, quatre-vingt-douzième et dernier de la classification des éléments naturels, est un mélange de deux isotopes principaux, l'uranium 238 et l'uranium 235, dont les noyaux ne diffèrent que par trois neutrons, et dont le plus léger, l'uranium 235, se trouve toujours dans la nature mélangé à l'uranium 238 dans la proportion constante de sept parties pour mille.

Les deux uraniums sont radioactifs, mais avec un rythme de destruction si lent (un milligramme par an et par tonne pour l'uranium 235 et sept fois moins pour l'uranium 238) qu'ils ont survécu aux cinq milliards d'années écoulées depuis la formation de l'écorce terrestre. Il en est de même pour le thorium qui, comme les deux uraniums, est le point de départ d'une des trois séries de radioéléments naturels [3].

Enfin, l'étude des phénomènes de la radioactivité a permis d'assister pour la première fois à la manifestation de ce que nous appelons aujourd'hui l'énergie atomique ou l'énergie nucléaire : elle apparaît dans le dégagement de chaleur qui accompagne la transmutation. Cette énergie

2. Du grec : *isos*, même, et *topos*, place, puisqu'ils occupent la même place dans la classification.

3. Ces séries, qui aboutissent finalement à des isotopes stables du plomb, comprennent au total une quarantaine de radioéléments. Chacun de ceux-ci a un rythme caractéristique et immuable de destruction plus ou moins rapide, et est constamment recréé à partir de son ancêtre à vie longue. Deux types de transmutation caractérisent les désintégrations naturelles : la radioactivité *alpha*, qui correspond à l'éjection d'un noyau d'hélium de masse 4, la radioactivité *bêta* à celle d'un électron; elles peuvent être accompagnées d'un rayonnement électromagnétique non corpusculaire pénétrant dit rayonnement *gamma*.

est, à masse égale mise en jeu, bien supérieure à celle qui intervient dans les réactions chimiques qui résultent des interactions des électrons périphériques des atomes; elle correspond à l'intervention des forces de liaison considérables qui unissent au sein des noyaux, par une sorte de ciment mal connu, les neutrons et les protons. Au moment de la transmutation radioactive, il se produit une légère déperdition de masse du noyau et transformation de cette masse en énergie d'après la loi d'équivalence d'Einstein.

Ainsi la moitié d'un gramme de radium est transmutée spontanément en plomb, en seize siècles durant lesquels cette désintégration s'accompagne d'un dégagement de chaleur supérieur à celui qui est fourni par la combustion de trois cents kilos de charbon. Étant donné la lenteur du débit, cette quantité de chaleur, énorme lorsqu'on la rapporte à la masse du radium mise en jeu, est évidemment inutilisable.

Tel était l'état de nos connaissances quelques années avant la Deuxième Guerre mondiale, l'énergie atomique était prête à jaillir des éléments lourds, mais ne se manifestait qu'à son bon plaisir et au compte-gouttes. Situation irritante pour les savants qui évaluaient déjà l'importance potentielle de ce réservoir d'énergie sans encore entrevoir le moyen de le rendre pratiquement disponible.

A cette époque, les minerais d'uranium étaient uniquement exploités pour l'extraction du radium [4], l'uranium restant un sous-produit en partie inutilisé car ses seuls débouchés avant la guerre étaient la fabrication de colorants jaunes destinés aux faïences et aux lunettes antisolaires. On avait en vain cherché à l'utiliser dans la composition d'aciers spéciaux et des sels d'uranium s'accumulaient en grands tas jaunes à l'usine belge de production de radium.

En effet, à la suite de la découverte en 1919 au Haut-Katanga de minerais exceptionnellement riches en uranium, la Belgique avait joui pendant près de quinze ans d'un quasi-monopole de la production du radium. Il fallut la découverte en 1932 de gisements importants dans

4. Le radium est présent dans tous les minerais d'uranium dans la proportion d'un gramme pour environ trois tonnes d'uranium.

le grand Nord canadien pour que la concurrence fît descendre au tiers de sa valeur le prix du radium que l'industrie belge avait d'abord maintenu à soixante quinze mille dollars le gramme.

Par ailleurs, les applications pratiques du radium et de ses dérivés restaient alors limitées aux peintures lumineuses, à la radiographie des pièces métalliques épaisses et surtout au traitement des tumeurs cancéreuses. Mais le prestige qui s'attachait au domaine essentiellement de recherche pure de la structure de l'atome était considérable; l'extraordinaire épopée des Curie y avait contribué comme aussi les utilisations médicales du radium dont l'action thérapeutique, liée à l'action destructrice des rayonnements sur les cellules cancéreuses, avait été découverte au début du siècle.

Dans l'esprit du public, les propriétés curatives du radium et les perspectives, mystérieuses encore, des recherches qu'il permettait d'entreprendre en faisaient oublier les dangers, bien que des accidents mortels aient déjà été observés à la suite de l'ingestion de l'élément et que certains des premiers savants qui l'avaient manipulé aient été atteints de brûlures chroniques; mais tout ce qui touchait à la radioactivité était l'objet de prestige et de publicité, comme la teneur en radium des eaux et boues thermales, ou son introduction voulue dans l'eau de table et les produits de beauté. C'était l'âge d'or de la radioactivité; nous en sommes loin aujourd'hui.

La radioactivité artificielle.

C'est à cette époque, en 1933, que ma carrière s'est orientée vers le domaine de la radioactivité, ayant eu la chance que Mme Curie, cherchant un préparateur, se tournât une dernière fois vers l'École de Physique et de Chimie où j'achevais mes études. Malheureusement, l'anémie pernicieuse provoquée par des années de travail sans précautions suffisantes devait emporter peu après cette femme extraordinaire avant que j'aie pu véritablement travailler sous sa direction. Elle m'avait toutefois déjà enseigné le délicat processus des cristallisations fractionnées, celui-là même qui lui avait permis d'isoler le radium. Je garde très vif encore l'émouvant souvenir, dans la

petite pièce de chimie de l'Institut du Radium créé par son inlassable ténacité, de cette dame déjà âgée, si frêle dans sa blouse de laboratoire noire, et dont la vie avait été la plus passionnante aventure scientifique que l'on puisse rêver.

Mme Curie souhaitait, après avoir dirigé ma formation, m'envoyer en Allemagne dans le laboratoire le mieux spécialisé dans la mesure des masses atomiques, afin de déterminer plus exactement celle du radium; j'étais loin de me douter que le drame nazi, du fait des mesures raciales prises en Allemagne, allait s'opposer à ce projet et m'amènerait quelques années plus tard, à la suite de l'invasion de mon pays, jusqu'aux États-Unis pour participer au développement militaire des problèmes liés à la radioactivité jusque-là entièrement pacifiques.

Quelques mois avant sa mort, en février 1934, Mme Curie avait éprouvé une grande satisfaction : celle de voir deux de ses élèves, son gendre Frédéric Joliot et sa fille Irène, révolutionner la physique moderne par la découverte de la radioactivité artificielle qui allait permettre à la science de passer du stade de l'alchimie naturelle à celui de l'alchimie dirigée.

Rutherford avait déjà eu en 1919 l'idée d'utiliser les grains de matière émis à grande vitesse par des radioéléments naturels, comme projectiles lancés contre des noyaux d'autres atomes, dans le but de provoquer des transmutations; il avait ainsi pu prouver, par l'étude des trajectoires des rayons radioactifs, qu'un noyau d'azote pouvait être transmuté par arrachement d'un proton; ce processus donne naissance à un noyau d'oxygène.

Douze ans plus tard, son élève James Chadwick, à la suite de travaux des écoles allemandes et françaises, réussissait à démontrer l'existence du neutron en bombardant des éléments légers avec les rayons du polonium.

En même temps, des techniques nouvelles apparaissaient, permettant de produire des faisceaux intenses de particules de haute énergie, utilisables comme projectiles de transmutation, grâce à des machines électromagnétiques complexes, appelées accélérateurs de particules, dont la plus efficace allait être le cyclotron inventé par Ernest Lawrence, en Californie. L'apparition de tels appareils,

dont la construction et le coût commencaient à dépasser les moyens des laboratoires universitaires, représentait une nouvelle étape dans le développement de la recherche physique.

On était ainsi arrivé à réaliser quelques rares transmutations d'atomes, mais on pensait que celles-ci étaient instantanées et aboutissaient à la création de noyaux stables. L'idée n'était pas venue que les bombardements d'atomes pouvaient créer de nouvelles espèces nucléaires radioactives dont l'instabilité, c'est-à-dire la radioactivité, se manifesterait au-delà de l'opération de bombardement.

Mettant en jeu les réserves uniques de matériaux radioactifs que Mme Curie avait, pendant plus de trente ans, accumulées avec la patience et la ténacité qui lui étaient propres, Irène et Frédéric Joliot préparent la plus forte source de polonium jusque-là disponible, et, exposant de l'aluminium aux rayons de cette source, ils découvrent qu'il s'y produit des atomes d'un isotope radioactif du phosphore que l'on ne connaissait pas dans la nature. Peu après, Fermi montre que les neutrons sont les particules de choix pour pénétrer dans les noyaux, sans être repoussés par la charge électrique de ceux-ci, et y créer des espèces radioactives nouvelles.

La porte est alors ouverte à la création de centaines de radioéléments artificiels dont les vies s'échelonnent entre des fractions de secondes et des millions d'années, et qui sont isotopes des éléments connus, des plus légers aux plus lourds. Ce sont des noyaux instables qui devaient vraisemblablement exister au moment des bouleversements cosmiques accompagnant la formation du système solaire, et qui ont disparu depuis en raison de leur période radioactive [5] relativement courte par rapport à l'âge de la terre. Leur formation met en jeu des forces nucléaires, c'est-à-dire libère de l'énergie d'origine atomique, mais avec des rendements extrêmement réduits, car le nombre d'atomes transmutés reste toujours relativement faible.

Aujourd'hui, les dispositifs qui libèrent l'énergie atomique sont aussi producteurs à une grande échelle de

5. La période radioactive d'un radioélément est la durée de temps pendant laquelle se désintègre la moitié des atomes initialement présents; elle caractérise ainsi son degré d'instabilité.

radioéléments artificiels dont les usages multiples et variés dans toutes les branches de la science et de la technique représentent un très important domaine annexe de l'énergie atomique.

La fission de l'uranium.

Une dernière étape restait à franchir pour arriver à la production massive et rapide d'énergie atomique, celle de la découverte d'un processus dans lequel l'altération d'un atome pourrait provoquer celle de plusieurs atomes voisins, et s'étendre ainsi de proche en proche, de même que la chaleur émise par l'oxydation d'un atome de carbone permet à la combustion de se propager aux atomes voisins.

Joliot disait dans sa Conférence Nobel en 1935 : « Si tournés vers le passé, nous jetons un regard sur le progrès accompli par la science à une allure toujours croissante, nous sommes en droit de penser que les chercheurs, brisant ou construisant les atomes à volonté, sauront réaliser des réactions nucléaires en chaînes explosives. Si de telles transmutations arrivent à se propager dans la matière, on peut concevoir l'énorme énergie utilisable qui sera libérée. »

On pensait déjà à cette époque que c'était vers les deux extrémités de la classification périodique que se trouvaient les plus grandes chances de production d'énergie nucléaire. Car l'on savait que si elles devenaient réalisables au laboratoire, deux sortes d'opérations se feraient avec déperdition de masse, c'est-à-dire libération d'énergie : la condensation des noyaux des atomes les plus légers en un noyau d'élément plus lourd et l'éclatement du noyau des éléments les plus lourds en noyaux d'éléments légers.

La première réaction, celle de condensation ou de fusion, a lieu dans les étoiles, elle est la source de l'énergie solaire, et aujourd'hui, de l'énergie libérée par la bombe H; mais c'est par éclatement du côté des éléments lourds qu'allait venir la première production humaine d'énergie nucléaire : quatre années allaient suffire pour découvrir la réaction en chaîne et vérifier la prophétie de Joliot.

Enrico Fermi, dès 1934, à Rome, eut l'idée de mettre à l'épreuve du bombardement par neutrons l'uranium, l'élément connu le plus complexe, pour tenter d'aller, au-delà de lui, dans la classification de Mendéléev. L'ex-

périence montra qu'au lieu du nouveau corps radioactif attendu, il s'en formait plus d'une vingtaine dont on n'arrivait pas à expliquer la nature ni l'origine.

Il fallut près de cinq ans pour résoudre cette énigme, cinq ans de travaux dont l'histoire est un extraordinaire exemple de compétition et de collaboration scientifiques internationales, entre les équipes de Fermi à Rome, des Joliot à Paris, de Hahn à Berlin et de Bohr à Copenhague.

Devant la complexité du mélange de radioéléments produits par le bombardement neutronique de l'uranium et la difficulté de les identifier chimiquement, Fermi abandonna le problème qui fut repris en 1935 par Otto Hahn, Lise Meitner et Fritz Strassmann à Berlin; ceux-ci, au bout d'un an de recherches, crurent avoir réussi à résoudre ce puzzle chimique et donnèrent à la vingtaine de radioéléments présents des identités allant des dernières cases connues du tableau de Mendéléev à celles de plusieurs éléments inconnus d'un nombre atomique plus élevé que celui de l'uranium.

Irène Curie, assistée du physicien yougoslave Paul Savitch doutant des résultats de Hahn, concentra l'année suivante ses efforts sur l'identification d'un seul de ces radioéléments, pensant qu'il était impossible de s'attaquer à tout le complexe chimique à la fois. Le problème est difficile à résoudre et, par deux fois, Irène Curie proposa une solution qui s'avéra inexacte à l'expérience; mais elle ne se découragea pas, et avec une obstination et une patience dignes de sa mère, elle réussit enfin, en 1938, à démontrer que les propriétés chimiques du radioélément étudié ressemblaient de très près à celles d'un élément connu, le lanthane, situé au milieu de la classification périodique. Cette hypothèse est en contradiction totale avec celle avancée antérieurement par l'école de Berlin.

Convaincus que les résultats d'Irène Curie étaient inexacts, Hahn et Strassmann furent néanmoins conduits par ce dernier travail à vérifier de nouveau leurs conclusions antérieures; ils allaient ainsi aboutir à la vraie piste. Utilisant le même processus de cristallisation fractionnée, qui, quarante ans auparavant, avait permis aux Curie d'isoler le radium, Hahn montra que les radioéléments formés dans l'action des neutrons sur l'uranium se com-

portent chimiquement exactement comme des éléments appartenant à la région moyenne de la classification périodique. Ils étaient en réalité des isotopes, et un mois après la publication de Hahn datant de la fin de l'année 1938, la preuve physique de l'éclatement du noyau d'uranium était donnée en janvier 1939 par les physiciens de diverses parties du monde, d'abord par Otto Frisch à Copenhague, puis indépendamment, une quinzaine de jours plus tard, par Frédéric Joliot à Paris, suivis par d'autres aux États-Unis et en Angleterre. Otto Frisch était un jeune physicien de talent, neveu de Lise Meitner; celle-ci lui avait signalé les conclusions des récentes recherches de Hahn auxquelles elle n'avait pas pu prendre part, ayant dû, en raison des persécutions raciales, se réfugier en Suède au printemps de 1938.

Le fait fondamental est le suivant : tandis que la radioactivité normale transforme le noyau émetteur par émission de rayonnements divers en un noyau très voisin, les noyaux d'uranium subissent sous l'action des neutrons un bouleversement total, se fendant en deux fractions projetées à grande vitesse. Ces fragments, appelés produits de fission, sont des atomes radioactifs appartenant à la région moyenne de la classification périodique, et qui se désintègrent par des séries de quelques radioéléments de périodes variées, jusqu'à l'aboutissement à un noyau stable.

Parmi les éléments naturels, seuls les atomes des deux plus lourds et plus complexes, l'uranium et le thorium, ceux-là mêmes dont l'instabilité est à l'origine de la radioactivité naturelle, sont susceptibles de donner lieu au phénomène de fission; mais c'est le noyau de l'uranium 235 qui est de beaucoup le plus apte à subir ce bouleversement provoqué sous l'action des neutrons; Niels Bohr devait, dès 1939, le déduire de considérations théoriques sur la constitution des noyaux d'atomes.

La fission d'un noyau d'uranium est accompagnée d'une grande émission d'énergie, correspondant à la déperdition d'environ une partie pour mille de sa masse.

Le phénomène de fission comporte ainsi deux caractéristiques principales : la libération d'énergie et la formation de produits radioactifs; il paraissait expliquer la limitation à

quatre-vingt-douze du nombre d'éléments normalement présents sur terre, puisque l'addition d'un grain de matière au noyau du plus lourd d'entre eux peut le faire éclater comme une goutte d'eau trop volumineuse. L'intérêt de la fission se limiterait à cet important aspect théorique s'il ne portait en lui la cause qui va permettre de l'étendre à des masses importantes de matière.

En effet, c'est en mars 1939 que Joliot, Hans Halban et Lew Kowarski, au Collège de France, démontrèrent que la rupture d'un noyau d'uranium, provoquée par un seul neutron, s'accompagne, outre la formation de deux produits de fission et la libération d'énergie correspondante, de l'émission de plusieurs neutrons dits neutrons secondaires.

C'est là le fait primordial qui va permettre la propagation du feu atomique, comme la chaleur que dégage la combustion permet à celle-ci de se poursuivre; les neutrons secondaires une fois libérés se perdent dans la masse de matière avoisinante, où ils vont créer de nouvelles fissions. L'agent de contagion était trouvé, la libération d'énergie atomique allait pouvoir s'appliquer à des quantités pondérables de matière; l'accès au réservoir immense d'énergie de l'atome allait être rendu possible par une nouvelle source qui se trouve être, à masse égale, près de trois millions de fois plus puissante que le charbon, ce qui est une discontinuité comme on en a rarement vu dans l'histoire de la science.

Ainsi l'uranium, l'élément qui a été le point de départ de notre histoire, allait être la base d'un rebondissement révolutionnaire. Quarante ans après la découverte du radium, la physique atomique cessait du jour au lendemain d'être seulement le domaine de la recherche fondamentale et l'apanage du chercheur isolé. Une nouvelle élite allait voir le jour et prendre une part croissante à la vie des grandes nations : celle du savant nucléaire conscient de ses responsabilités morales et politiques.

Une ère nouvelle venait de s'ouvrir, où, sur certains fronts de la recherche scientifique, l'avance allait nécessiter une mobilisation de toutes les forces d'un pays, parfois même de plusieurs nations : l'énergie atomique allait en être le premier exemple.

2.

Du laboratoire à Hiroshima.

1939-1945.

La Deuxième Guerre mondiale porte la responsabilité du développement foudroyant des conséquences de la découverte de la fission au cours d'une extraordinaire action où nos techniques et moyens modernes ont été mis en jeu par une collaboration étroite entre savants, industriels, militaires, hommes d'État et gouvernements alliés.

Dès le printemps 1939, la presse s'empare du sujet et envisage toutes les anticipations : de la centrale électrique atomique à la bombe en passant par le moteur de sous-marin; les possibilités d'application de la découverte de la fission se déduisent facilement de la concentration étonnante de cette nouvelle source d'énergie.

Dans la plupart des pays, la France en tête, les savants avertissent leurs gouvernements et ne ménagent pas leurs efforts pour les convaincre de l'importance de la question et obtenir l'aide nécessaire pour poursuivre leurs études à une échelle plus grande.

Le plus obsédé par la puissance éventuelle de l'arme envisagée est, à cette époque, le physicien hongrois Léo Szilard. Dès le mois de février 1939, il entre en relation, de New York, avec les savants des pays destinés à être alliés dans la guerre qu'il prévoit avec certitude. Il leur propose de cesser d'un commun accord toute publication sur la fission nucléaire. Je me rappelle la surprise que provoqua, à son arrivée au laboratoire Joliot du Collège de France, un télégramme, envoyé par un collègue de Szilard, de plus de cent quarante mots, le plus long que nous ayons jamais vu, et la discussion qui s'en-

suivit pour savoir s'il serait possible, ou non, d'obtenir un accord général volontaire pour garder le secret sur les résultats des recherches en cours et à venir. La chose paraissait inapplicable en physique nucléaire, jusque-là domaine de la science pure par excellence. Le libre échange des connaissances avait toujours été complet et avait parfois même l'aspect d'une course où quelques jours de plus ou de moins dans l'envoi d'une communication à un journal scientifique pouvait représenter pour son auteur la différence entre la gloire de la découverte ou la satisfaction moindre de la confirmation de celle-ci. Ceci venait d'ailleurs d'être le cas pour la découverte des neutrons secondaires faite indépendamment, à Paris par l'équipe de Joliot, et une semaine plus tard par Szilard et Fermi à New York où le savant italien venait de s'établir, ayant, après la réception de son prix Nobel à Stockholm en fin 1938, renoncé à rentrer en Italie en raison du régime faciste.

La proposition dont Szilard avait pris l'initiative ne fut pas complètement comprise ni acceptée, mais peu de mois plus tard, juste avant le début de la guerre, chaque pays commença indépendamment à tenir secret le résultat de ses recherches sur l'uranium.

Démarrage de l'effort français.

En France, tout d'abord, l'équipe Joliot, Halban et Kowarski, à laquelle s'était joint Francis Perrin, comprit assez rapidement que, dans l'uranium naturel, seul l'isotope rare, l'uranium 235, subit facilement la fission. Par contre, l'uranium 238 est beaucoup plus difficilement accessible à la réaction de fission propagée par les neutrons, au contraire il tend à les absorber avant qu'ils aient eu le temps de remplir leur rôle et agit ainsi dans le mélange un peu à la manière d'eau dans la poudre à canon mouillée. C'est une des raisons pour lesquelles l'uranium n'explose jamais dans la nature, et qu'il s'en trouve encore sur la terre. Toutefois, Joliot et ses collaborateurs arrivèrent à la conclusion qu'on pouvait tenter néanmoins de réaliser une réaction en chaîne à partir de l'uranium 235 dilué au sein même de l'uranium naturel.

En effet, l'expérience prouve que les neutrons secondaires qui sont émis à de très grandes vitesses deviennent, lorsqu'ils sont ralentis, plus aptes à provoquer la fission de l'uranium 235. Or, on sait ralentir des neutrons rapides, il suffit de placer dans leur parcours des substances contenant des noyaux légers au contact desquels ils abandonnent par chocs successifs une partie de leur énergie, de même qu'une bille se ralentit en heurtant des billes de même taille auxquelles elle cède peu à peu sa force vive. On est donc amené à mélanger à l'uranium un corps dit modérateur qui ralentit les neutrons sans trop les absorber. Ce principe a constitué la base des premières demandes de brevets, déposés en France au début du mois de mai 1939; l'un d'eux est consacré à l'utilisation explosive de l'uranium, les autres sont relatifs aux machines génératrices d'énergie à base d'uranium, qu'on devait nommer plus tard piles ou réacteurs atomiques. Ces brevets, les premiers à avoir été déposés dans le monde, sont reconnus par de nombreux pays. Ils appartiennent à la nation et constituent une première anticipation des futures armes et des machines actuellement en fonction.

En automne 1939, la guerre est déclarée. La poursuite des travaux s'en trouve encouragée. Il n'est pas question en France, à cette époque, d'envisager la réalisation d'une bombe considérée comme trop difficile, mais plutôt la construction de générateurs d'énergie : les techniciens ne réalisent pas exactement la difficulté des problèmes, et ils considèrent qu'un moteur de sous-marin serait peut-être réalisable en quelques années et présenterait pour la propulsion sous-marine l'énorme avantage de ne pas nécessiter de consommation d'oxygène.

Le problème des ralentisseurs est abordé en commençant par l'hydrogène, mais l'étude du mélange eau ordinaire-uranium montre rapidement que l'hydrogène absorbe trop facilement les neutrons pour convenir. Finalement, l'équipe de Joliot arrive à la conclusion que deux modérateurs ou ralentisseurs pourraient sans doute être pratiquement utilisés : le carbone pur sous forme de graphite, et l'eau lourde. Cette dernière est le composé de l'oxygène avec un isotope de masse 2 de l'hydrogène, le

deutérium, qui est contenu dans la proportion d'une partie pour six mille dans tout l'hydrogène de la nature, et qui absorbe beaucoup moins les neutrons que l'hydrogène ordinaire de masse 1. L'eau lourde est extrêmement difficile à séparer de l'eau ordinaire qui n'en contient que cent soixante milligrammes par litre et sa préparation nécessite la mise en œuvre de procédés complexes de fractionnement qui consomment des quantités d'énergie très élevées.

L'hydrogène lourd avait été découvert en 1932 par le savant américain Harold Urey, lorsqu'il avait identifié dans l'eau une fraction plus dense après un nombre considérable de distillations successives. Jusqu'à la guerre, l'eau lourde, qui valait un demi-dollar le gramme, ne fut utilisée que pour des recherches scientifiques; néanmoins une société industrielle franco-norvégienne d'ammoniaque de synthèse en entreprit la fabrication, en l'absence de débouché prévisible, à l'échelle des kilogrammes, en mettant à profit le coût réduit de l'électricité en Norvège et un système d'électrolyse fractionnée lié à la production principale d'ammoniaque.

Le ministre de l'Armement, Raoul Dautry, est mis au courant des recherches et, grâce à son appui, une mission secrète, dirigée par un de ses collaborateurs, Jacques Allier, part pour Oslo en mars 1940, quelques semaines avant l'invasion de la Norvège, pour en ramener cent soixante-cinq litres d'eau lourde, stock unique au monde de cette précieuse substance.

Dautry, avec une largeur de vues caractéristique de ce grand serviteur de l'État, comprend l'importance du problème et donne à Joliot des facilités exceptionnelles : crédits illimités, possibilité de rappeler des armées tout collaborateur qui lui serait nécessaire. Il amorce, en même temps, une collaboration avec la recherche britannique en envoyant à Londres pendant quelques heures, en avril 1940, Allier, pour y communiquer nos premiers résultats. Parallèlement, des contrats sont passés avec la firme norvégienne productrice pour assurer à la France la totalité de l'eau lourde des années à venir; un autre contrat en négociation avec l'industrie belge nous aurait réservé la production en uranium du Congo belge, la plus riche source d'uranium du monde à cette date. De plus

une fourniture de six tonnes d'oxyde d'uranium belge est faite à Joliot.

Ainsi, à la fois dans le domaine technique comme dans celui de l'approvisionnement en matières premières, le démarrage de l'effort français apparaît excellent. Il fut malheureusement arrêté dans son essor par l'invasion du pays.

Le laboratoire de Joliot et l'eau lourde sont d'abord repliés à Clermont-Ferrand puis, finalement, une grave décision est prise à Bordeaux le 16 juin 1940 : Halban et Kowarski iront en Angleterre avec le précieux produit et se mettront à la disposition des autorités britanniques pour y poursuivre les expériences commencées en France; Joliot, qui ne se rend pas assez compte du rôle capital qu'il aurait pu jouer dans la poursuite des travaux au Royaume-Uni et aux États-Unis, renonce à les suivre, décidant de rester à la tête de son laboratoire dans le pays occupé.

L'apport anglais.

Les Anglais sont tout aussi conscients de l'importance du problème, mais, contrairement à Joliot, ils attachent plus d'importance à l'arme atomique. Au cours de l'été 1939, Winston Churchill est alerté par son très proche conseiller, Lord Cherwell, qui est un physicien professeur à Oxford. Ce dernier lui explique l'énorme difficulté qu'il y aurait à fabriquer une bombe atomique et l'avertit qu'une éventuelle menace par les nazis de bombarder l'Angleterre par une telle arme devrait, à cette date, être considérée comme un bluff dont il ne faudrait pas tenir compte.

Cependant en avril 1940, les Anglais créent, au ministère de la Production aéronautique, un comité dont le nom de code est le « MAUD[1] Committee », qui groupe, sous la présidence de George Thomson, tous les grands physiciens britanniques, dont James Chadwick, John Cockcroft, Marcus

1. Maud est le prénom d'une gouvernante anglaise des enfants de Niels Bohr. Celui-ci envoya au début de la guerre, de Copenhague, à un de ses collègues anglais, un télégramme demandant des nouvelles de Maud; les Anglais interprétèrent de façon erronée le prénom comme signifiant Military Application of Uranium Desintegration.

Oliphant, et où siègent également les savants d'origine allemande Rudolf Peierls et Otto Frisch. Ce dernier était venu en Angleterre peu après sa découverte de la fission à Copenhague. La tâche de ce groupe est de décider si une bombe atomique serait ou non réalisable durant cette guerre et si son effet militaire justifierait l'effort nécessaire pour la produire.

Pour mieux saisir le processus de l'explosion atomique, on peut rappeler l'anecdote de l'inventeur du jeu d'échecs qui obtint de l'empereur des Indes que celui-ci lui donnât comme récompense la quantité de blé obtenue en plaçant un grain de blé sur la première case de l'échiquier, deux sur la seconde, quatre sur la troisième, et ainsi de suite; bien avant d'arriver à la soixante-quatrième et dernière case, il n'y avait pas assez de blé dans le monde entier pour satisfaire le contrat. Si l'on considère maintenant une masse d'uranium 235 pur, la fission d'un noyau par un neutron en fournit au moins deux autres qui, à leur tour, vont servir d'amorce pour la rupture de deux nouveaux noyaux, libérant cette fois quatre neutrons à la seconde génération, huit à la troisième, mille à la dixième, un milliard à la trentième; vers la quatre-vingtième génération, il y aura assez de neutrons secondaires pour provoquer la fission du nombre immense d'atomes que représentent quelques kilogrammes d'uranium 235. Cette réaction en chaîne dans de la matière fissile pure se fait en un temps infiniment court, de l'ordre du dix-millionième de seconde, car l'intervalle entre deux générations successives est de l'ordre du milliardième de seconde, l'énergie de fission est ainsi libérée d'une façon massive et explosive.

Si cette multiplication de neutrons ne s'applique qu'à une petite masse, une sphère d'uranium 235 par exemple, il y aura des neutrons qui, atteignant la surface de la sphère, s'échapperont à l'extérieur et seront perdus pour le développement du processus de fission. Plus le rayon de la sphère est grand, plus sa surface est petite par rapport à son volume, et plus la proportion de neutrons perdus est faible, par rapport à la quantité de neutrons produits. On arrive ainsi à la notion de taille critique au-dessous de laquelle il y a trop de neutrons perdus, et impossibilité

de réaction explosive en chaîne car elle s'arrête immédiatement, et au-delà de laquelle il y a plus de neutrons formés dans la masse qu'il ne s'en perd, et, par suite, possibilité d'explosion.

Cet important concept de volume et par suite de masse critique, avait été précisé dès 1939 par Francis Perrin. C'est Chadwick qui, en 1940, calcula le premier la masse critique pour l'uranium 235, qui est de l'ordre d'une vingtaine de kilos, correspondant à un volume voisin d'un litre. Toute sphère d'uranium 235 de masse inférieure à la masse critique est un morceau de métal inoffensif; toute sphère de masse plus grande devient instantanément le siège d'une explosion terrifiante.

Le MAUD Committee arrive ainsi à la conclusion qu'une bombe atomique est réalisable; comme il s'est moins penché sur les appareillages générateurs d'énergie nucléaire, Halban et Kowarski, avec leur eau lourde et leurs projets, sont accueillis avec un vif intérêt, et un laboratoire est mis à leur disposition à Cambridge. Ils y réalisent fin 1940 l'expérience qui avait été décidée avec Joliot, et montrent que la réaction en chaîne divergente est possible dans un système d'uranium et d'eau lourde, mais que la masse critique d'un pareil système exigerait des tonnes d'eau lourde. On en est loin avec les cent soixante-cinq litres disponibles; de même il faudra des tonnes d'uranium. Cette expérience a une importance considérable, car c'est la première qui met en évidence la possibilité de réaliser des machines produisant de l'énergie à partir de l'uranium.

Par ailleurs, il devient très vite évident qu'un effort industriel considérable serait nécessaire pour produire, en temps utile, les quantités d'uranium 235 nécessaires pour faire une bombe. Il est hors de question pour l'Angleterre, en 1941, de faire cet effort, car son industrie entière est mobilisée et ne peut consacrer aucune fraction appréciable de son activité à une tâche qui n'est pas liée à la poursuite immédiate de la guerre. Les principaux physiciens anglais sont activement engagés dans l'étude du dispositif tenu secret qui va permettre de gagner la bataille d'Angleterre et que l'on connaît maintenant sous le nom de radar.

Durant l'été 1941, le MAUD Committee arrête ses travaux. Ses membres sont convaincus que seuls les États-Unis auraient le potentiel nécessaire pour accomplir la tâche dans un délai raisonnablement rapproché; certains savants en Amérique s'en rendent déjà parfaitement compte.

L'entreprise américaine.

Par-delà l'Océan, dès 1939, les réactions sont les mêmes qu'en France et en Angleterre. Léo Szilard, dont le génie est toujours de quelques années en avance, obsédé par la crainte que l'Allemagne ne gagne la course atomique, essaie d'intéresser les milieux officiels à ces problèmes.

Dès mars 1939, il prend un premier contact avec la marine, qui déclare n'être pas intéressée. Il faut frapper plus haut, aller plus vite, la guerre en Europe monte à l'horizon. Il gagne à sa cause un autre physicien d'origine hongroise, Eugène Wigner, et tous deux vont trouver Albert Einstein qui leur promet toute son aide. Finalement, pour atteindre le Président Roosevelt, on s'adresse à Alexander Sachs de New York, ami personnel du chef d'État, spécialiste des crises financières, un homme que les pays d'Europe appelaient en consultation quand il fallait effectuer une dévaluation à chaud.

Sachs, en septembre 1939, est reçu par Roosevelt et lui apporte une lettre d'Einstein et un rapport de Szilard; celui-ci mentionne les travaux français comme probablement les plus avancés de l'époque. La lettre d'Einstein au Président des États-Unis, datée du 2 août 1939, envisage les effets d'une éventuelle bombe atomique, prévue très volumineuse, en termes frappants : « Une seule de ces bombes, introduite par bateau dans un port, pourrait fort bien détruire entièrement le port et raser complètement le territoire environnant. De telles bombes pourraient cependant se révéler trop lourdes pour le transport par air. » Roosevelt décide aussitôt de la formation d'un Comité consultatif de l'Uranium.

En 1940 et 1941, les recherches se poursuivent sous l'égide de ce Comité, mais toujours à l'échelle relativement peu importante des laboratoires universitaires. Plusieurs faits de grande signification sont cependant mis en évidence durant cette période.

Tout d'abord Fermi et Szilard, à l'Université de Columbia de New York, prouvent que le carbone, sous forme de graphite très pur, peut servir de modérateur pour permettre la réalisation d'une réaction en chaîne dans l'uranium naturel, à condition de n'utiliser que de l'uranium très raffiné. Il faudra des dizaines de tonnes de ce dernier, des centaines de tonnes de graphite. Ils cherchent en vain un financement officiel ou même privé qui permettrait d'aborder le stade industriel.

En 1940, le physicien américain Alfred Nier réussit à isoler quelques millièmes de milligramme d'uranium enrichi en 235, et confirme que c'est celui-ci qui subit la fission.

Enfin, à la fin de la même année, au laboratoire du cyclotron géant de l'Université de Californie, le chimiste américain Glenn Seaborg, qui sera en 1961 le premier savant à présider la Commission atomique américaine, arrive à montrer avec ses collaborateurs que l'uranium 238 peut se transmuter, sous l'action des neutrons, en un élément nouveau, le plutonium 239, dont il isole aussi quelques millièmes de milligramme. Il trouve que le plutonium, comme l'uranium 235, est fissile par les neutrons lents. Il en résulte que si l'on réussit à établir une réaction en chaîne dans l'uranium naturel, tandis que l'isotope rare, l'uranium 235, se consumera par fission en produisant de l'énergie et des corps radioactifs, une fraction de l'isotope le plus abondant, l'uranium 238, sera transmutée en plutonium 239, qui peut jouer un rôle analogue à celui de l'uranium 235.

Le plutonium est l'élément qui occupe la quatre-vingt-quatorzième case de la classification périodique; il n'existe pas sur terre, car il est radioactif avec une période radioactive de vingt-quatre mille ans [2].

Enfin, en 1941, Robert Oppenheimer à l'Université de Californie à Los Angeles parvient par le calcul aux mêmes conclusions que Chadwick en Angleterre pour la masse critique de l'uranium 235 et, de plus, il évalue celle du

2. L'on a identifié aujourd'hui onze éléments occupant au-delà de l'uranium les cases 93 à 103 de la classification périodique. Découverts pour la très grande majorité par Glenn Seaborg et son équipe, ils sont tous radioactifs et leur instabilité croît avec leur numéro atomique. Ils ont été, en général, obtenus les uns des autres par bombardement par neutrons dans une pile ou une explosion atomiques.

plutonium qui n'est que de sept kilos et correspond approximativement à un volume d'un tiers de litre. Il en déduit qu'une bombe de puissance explosive égale à celle de dizaines de milliers de tonnes de trinitrotoluène serait réalisable si l'on pouvait disposer de quantités de combustibles nucléaires supérieures à ces masses critiques.

Parallèlement, la séparation isotopique de l'uranium 235 est étudiée principalement à New York, par Urey, le spécialiste des isotopes qui a découvert et isolé l'eau lourde, et en Californie sous la direction d'Ernest Lawrence, l'inventeur du cyclotron.

Au début de l'automne 1941, Oliphant, savant australien de l'équipe britannique, de passage aux États-Unis, réussit à approcher les sphères gouvernementales et à leur expliquer que chaque jour qui passe rapproche du moment où l'Angleterre risque d'être saupoudrée de poisons radioactifs ou écrasée sous les bombes atomiques, car les renseignements recueillis semblent indiquer que les Allemands tentent un effort considérable dans cette direction.

L'Angleterre, explique Oliphant, est hors d'état d'entreprendre l'effort technique nécessaire. Seuls les États-Unis, dont le potentiel énorme est loin d'être entièrement absorbé par la guerre, peuvent se lancer dans l'opération. On accorde souvent plus de crédit aux recommandations d'un étranger, et les Américains reconnaissent que l'intervention anglaise, qui avait elle-même été catalysée par la contribution française, fut d'un grand poids dans la décision qu'ils prirent, vers la fin de 1941, de s'engager enfin dans les voies de la réalisation.

L'entrée en guerre des États-Unis renforça cette décision et, une semaine après Pearl Harbour, un Comité supérieur fut créé et réuni. Il comprenait entre autres le Vice-Président Henry Wallace, le ministre de la Guerre Henry Stimson, et le Chef d'État-Major George Marshall.

Une réorganisation complète de l'effort atomique est décidée. Un premier groupe est créé à l'Université de Chicago sous la direction du physicien américain Arthur Compton, qui va réunir l'équipe de Fermi et Szilard de

New York avec celle de Seaborg de Californie. Ce groupe prend le nom de code de « Metallurgical Project » et commence à fonctionner dès avril 1942; sa tâche est d'établir d'une part si une réaction en chaîne uranium-graphite est réalisable, et d'autre part s'il est possible de mettre au point une méthode chimique d'extraction du plutonium formé dans cette réaction en chaîne.

En fin de 1941 et au début de 1942, des échanges de vues ont lieu avec les savants anglais, à la suite desquels il est admis qu'une réaction en chaîne uranium naturel-eau lourde fonctionnerait certainement mais nécessiterait trop d'eau lourde pour permettre une réalisation rapide. On donna ainsi à l'utilisation du ralentisseur eau lourde une priorité moins grande qu'à celle du ralentisseur graphite.

Détaché par les Forces Françaises Libres auprès du groupe atomique anglais, je suis envoyé par celui-ci à Chicago en juillet 1942; plus de cent travailleurs scientifiques y sont déjà à l'œuvre, dispersés dans les laboratoires de l'Université, et une atmosphère excellente règne dans ce groupe de jeunes techniciens enthousiastes.

Le planning, envisagé à cette date et qui sera miraculeusement respecté, prévoit la fabrication de la bombe en trois ans; les ingénieurs savent qu'il s'agit d'une arme dont le potentiel de destruction n'aura rien de commun avec le passé, mais leurs scrupules moraux sont à cette date étouffés à la fois par la crainte que les Allemands ne soient sur la même voie et sans doute en avance, et aussi par l'intérêt passionnant des recherches.

Fermi est le grand physicien de l'équipe, il n'a alors que quarante et un ans, mais est encore plus jeune de caractère; expérimentateur hors pair il ne quittera jamais le laboratoire et même l'atelier jusqu'à sa mort prématurée en 1954; il sera ainsi l'un des rares savants nucléaires à avoir échappé à l'évolution qui transforme inévitablement en administrateurs scientifiques la plupart des chefs des grandes équipes de chercheurs. Sportif, il allait tous les soirs, en été, se baigner près de l'Université dans le lac Michigan, entouré de ses plus proches collaborateurs; au cours d'un de ces rares moments de détente, un de ses collègues se plaignant du nombre croissant de réunions qui nuisait au travail de laboratoire, Fermi lui rétorqua que

seulement ceux qui le voulaient bien faisaient partie de comités et perdaient leur temps dans des réunions.

Fermi était responsable du travail sur la réaction en chaîne uranium-graphite. Depuis peu, la fabrication de graphite très pur (il faut qu'il y reste moins d'une partie sur dix millions de certaines impuretés) n'était plus un problème, non plus que la production par tonnes d'uranium métallique de pureté comparable. Ce métal n'avait été préparé avant la guerre que sous forme impure et par quantités de l'ordre du gramme.

Heureusement pour les Alliés, les deux principales sources mondiales d'uranium sont entre leurs mains; les mines du Great Bear Lake dans le grand Nord canadien, que l'on exploite à fond, et celles plus riches du Congo belge où l'extraction, arrêtée au début de la guerre, va lentement reprendre.

C'est sous les gradins du terrain de football de l'Université que se monte dans le plus grand secret l'édifice à base de graphite et d'uranium auquel Fermi va donner le nom de pile atomique du fait qu'il s'agit d'un véritable empilement.

Dans une enceinte mystérieuse toute brillante de poudre de graphite, des hommes noirs de la tête aux pieds construisent dans le plus grand secret une structure noire et brillante de plusieurs mètres de côté, composée de barres de graphite dont certaines sont creuses et contiennent une masse d'uranium métal ou d'oxyde d'uranium comprimé.

La vue de cette construction étrange était émouvante, car nous savions que l'issue de la guerre et par conséquent le destin du monde y étaient peut-être suspendus.

Au fur et à mesure que l'empilement croît, les physiciens font des mesures de multiplication de neutrons qui montrent que l'on se rapproche progressivement de la taille critique à partir de laquelle le facteur de reproduction des neutrons va dépasser l'unité.

Enfin le 2 décembre 1942, date historique de l'ère atomique, la réaction en chaîne est amorcée, et la pile entre en fonctionnement. Pour éviter tout accident, des barreaux de cadmium (substance qui absorbe fortement les neutrons) sont enfoncés dans la pile. De temps en temps, au fur et à mesure de la construction, on les retire très

lentement, et quand la pile a atteint une taille suffisante pour permettre son fonctionnement, en sortant assez ces barreaux de cadmium, les neutrons (toujours présents du fait du rayonnement cosmique ou d'une faible fission spontanée de l'uranium) commencent à se multiplier en progression géométrique. Lorsque la densité de neutrons, indiquée par un appareil de mesure, devient assez grande, on enfonce à nouveau les barreaux de cadmium jusqu'à une profondeur qui correspond à un facteur de reproduction égal à l'unité et la densité neutronique alors obtenue se maintient.

Ainsi pour le système uranium naturel-graphite, qui constitue l'élément essentiel de la pile, il existe une masse critique comme dans le cas de la bombe. Il y a toutefois deux différences fondamentales : la première est que, pour l'uranium naturel, des tonnes de produit sont indispensables pour obtenir la masse critique par opposition aux quelques kilogrammes qui sont nécessaires dans le cas de l'uranium 235 pur et du plutonium. La deuxième différence est due au fait que les neutrons étant ralentis, la production des générations successives de neutrons est beaucoup plus lente que dans la bombe, ce qui rend la pile contrôlable, la réaction en chaîne prenant alors des secondes pour démarrer tandis que dans la bombe, la durée du déclenchement est inférieure au dix-millionième de seconde.

La pile atomique à uranium naturel est de plus une véritable machine alchimique car, au fur et à mesure que de l'uranium 235 s'y consume par fission, il s'y produit à partir de l'uranium 238 du plutonium en quantité approximativement équivalente à celle de l'uranium 235 détruit. Pour chaque gramme d'uranium 235 consumé, il se dégage vingt mille kilowattheures d'énergie et se crée un peu moins d'un gramme de plutonium.

Or, tandis que l'uranium 235 est extrêmement difficile à séparer de son isotope l'uranium 238, la séparation du plutonium de l'uranium est relativement facile, comme est celle de deux métaux de propriétés chimiques différentes.

Néanmoins, en pratique, le problème de l'extraction du plutonium à partir de l'uranium irradié dans la pile est très compliqué en raison de l'intense radioactivité des

produits de fission présents. Au cours des opérations chimiques de séparation, il faut protéger le personnel contre l'action nocive des rayonnements émis.

A Chicago, après quelques jours de fonctionnement à des puissances d'une fraction de watt, il fallut arrêter la pile de Fermi, car les rayonnements émis auraient fini par devenir dangereux pour les passants et pour les gens habitant au voisinage du terrain de football de l'autre côté de la rue. Cette première pile, construite par approximations successives, dans un but purement expérimental, n'était pas munie d'écrans protecteurs. C'est à peine si l'on pensait qu'elle fonctionnerait, et, en tout état de cause, elle n'était pas conçue comme une construction permanente ou même durable.

Par ailleurs, l'équipe de Seaborg (à laquelle j'avais été assigné, et qui comprenait une trentaine de chimistes dont l'aîné, son chef, avait trente et un ans) réussissait à isoler un cinquième de milligramme de plutonium, la première quantité de plutonium visible à l'œil nu, à partir de quelques centaines de kilos de sels d'uranium bombardés par le plus puissant cyclotron du monde à cette date, celui de Californie. Quand, le 18 août 1942, au cours de la réunion des chercheurs du projet (réunion hebdomadaire qui, de séance en séance, voyait croître le nombre des travailleurs avec une cadence digne de la réaction en chaîne), Seaborg se leva pour annoncer qu'il avait vu pour la première fois — une substance transmutée par l'homme — une infime quantité d'un sel de plutonium, de couleur rosée, Edward Teller, le chef du groupe de physique théorique, demanda de quel sel il s'agissait; Seaborg répondit qu'il ne pouvait le lui dire, tant était stricte la compartimentation des connaissances destinée à éviter les fuites.

On pensait alors avec raison que les Allemands ne possédaient pas de cyclotron assez puissant pour leur permettre de découvrir et d'isoler le plutonium. Aussi quelle avait été ma surprise, lors de mon accueil à Chicago en juillet 1942 par Compton, le chef du Metallurgical Project, de m'entendre dire par ce grand physicien que parmi beaucoup de secrets qui m'allaient être révélés, l'insolubilité du fluorure du plutonium était non moins importante que la découverte de cet élément, car elle était la

base du premier procédé d'isolement. Le fait de classer dans le domaine du secret l'insolubilité d'un sel de métal semblait étonnamment paradoxal à un chimiste dont une partie des études, celle consacrée aux techniques de l'analyse, consistait précisément à apprendre pour chaque élément les solubilités caractéristiques de ses différents composés.

Pendant ce même été 1942, peu avant le moment où pour la première fois l'avance allemande était arrêtée à Stalingrad et devant Alexandrie, une grave décision politique avait été prise : il avait été décidé de passer au stade des grandes réalisations industrielles et d'en confier la direction à l'armée. Ce n'est pas sans une lutte violente avec la plupart des savants que fut fondée l'organisation militaire appelée le « Manhattan District » en raison de son siège à New York; les techniciens craignaient que l'esprit militaire ne nuisît au degré de liberté indispensable à l'épanouissement de la recherche scientifique.

En effet, les règles du secret furent considérablement renforcées et des consignes militaires s'appliquèrent à la recherche scientifique. La plus extraordinaire était celle qui classait secrets les principaux ouvrages de référence sur l'uranium qui garnissaient pourtant avant la guerre les bibliothèques de tous les grands laboratoires scientifiques. La compartimentation devint si sévère qu'elle constitua souvent une gêne sérieuse pour les chercheurs qui étaient conduits parfois à faire certains travaux en double, ou qui arrivaient difficilement à raccorder entre elles des recherches connexes.

Toutefois, il n'y a aucun doute que l'armée par son poids contribua à obtenir les priorités indispensables à l'avancement rapide des grandes réalisations techniques. Elle put ainsi réunir, puis administrer les très grandes équipes scientifiques nécessaires, tout en gardant très strictement le secret vis-à-vis de l'ennemi.

Le Manhattan District fut très bien dirigé par le général Leslie Groves, jeune général du corps des ingénieurs, remarquable par son énergie et son dynamisme extraordinaires, qui fit confiance aux savants et à leur affirmation

que la bombe atomique était réalisable, bien qu'il ne pût les suivre sur le terrain complexe de leurs théories et de leurs calculs.

C'est en fin 1942 que furent créées trois grandes réserves militaires, connues au début seulement sous les noms de X, Y et W.

X était dans la vallée du Tennessee; c'est Oak-Ridge, devenu une ville de plus de cinquante mille habitants, construite de 1943 à 1945, où furent montées les deux usines de séparation isotopique de l'uranium 235, et la première pile expérimentale au graphite refroidie par air.

W était à Hanford, dans l'État de Washington. C'est là que furent construites les très grandes piles au graphite productrices de plutonium.

Enfin Y était le « camp de concentration des prix Nobel » de Los Alamos, où l'étude et la construction de la bombe allaient se poursuivre dans un cadre merveilleux, mais où tous ceux qui s'y trouvaient signaient l'engagement de rester pendant toute la durée de la guerre, et six mois après sa fin.

Dans chacun de ces sites, et en particulier à Oak-Ridge et Los Alamos, furent créés pour la première fois des établissements scientifiques géants groupant des milliers de techniciens, savants et ingénieurs spécialistes de toutes les disciplines depuis les mathématiques pures jusqu'à la biologie, en passant par la physique, la chimie, l'électronique, et la métallurgie. Les ingénieurs chargés de la construction des grands ensembles industriels participaient à la recherche de laboratoire pour mieux pouvoir en prendre le relais. Ainsi de véritables troupes pouvaient aborder le développement d'un domaine scientifique déterminé sur un front d'une largeur inconnue jusque-là; mais la direction scientifique et la gestion administrative de ces sortes de tours de Babel de la technique allaient poser des problèmes complexes dont la solution reste toujours très délicate.

Au total, dans le pays, près de cent cinquante mille travailleurs furent affectés aux différents aspects de l'entreprise qui de ce fait était bien connue des milieux scientifiques et industriels, au moins dans son ampleur sinon dans son objectif exact. Les problèmes de recrutement étaient multiples et complexes : par exemple, une jeune physicienne

ayant quelque pratique de la radioactivité se présenta en 1943 à l'Université de Columbia à New York où, avait-elle appris, on cherchait des techniciens de sa spécialité; elle remplit de longs formulaires et il lui fut promis une réponse pour dans deux ou trois mois. Rentrant chez elle le soir, son mari dont elle avait dû signaler le métier : graveur sur plomb, lui annonça, à sa grande stupeur, qu'il avait été embauché le jour même, tellement on recherchait des techniciens susceptibles de contribuer à l'étude des membranes poreuses métalliques pour la séparation isotopique de l'uranium.

Les problèmes techniques étaient bien entendu à l'échelle des problèmes humains. Un des plus difficiles à résoudre fut celui du refroidissement des piles de Hanford, dont l'ensemble n'était pas loin de fournir autant d'énergie que les Parisiens en consommaient alors sous forme d'électricité. Plusieurs centaines de grammes de plutonium y étaient produits chaque jour. Le refroidissement était réalisé par passage, sous pression et à très grande vitesse, de l'eau très pure de l'importante rivière Columbia, circulant entre les doubles gaines d'aluminium qui enrobaient les barres d'uranium. La température de l'eau de la rivière était ainsi relevée de plusieurs degrés du fait de la chaleur dégagée dans les piles qui n'était pas récupérée.

Lors de son fonctionnement la pile devient intensément radioactive. Pour éviter la propagation externe des rayonnements à effets nocifs, elle est revêtue d'épais murs de béton et de plomb. Périodiquement, des barreaux d'uranium sont retirés et dirigés vers l'usine chimique où se fait l'extraction du plutonium, située dans une sorte de canyon artificiel, couloir de quelques centaines de mètres de long, bordé de murs de béton de plusieurs mètres d'épaisseur, et où, par une série de cycles d'opérations chimiques commandées à distance, le plutonium se trouve finalement séparé de l'uranium et des produits de fission. Dans la mise en route de l'installation pilote d'une de ces usines un des appareils ayant été mis hors de fonctionnement, on dut, pour le remettre en marche, avoir recours à cent cinquante hommes qui ne restèrent chacun qu'une demi-minute auprès de l'appareil. Le service médical avait interdit un contact plus prolongé.

Ces usines d'alchimie moderne furent construites uniquement d'après les données de base obtenues sur moins d'un milligramme de produit.

Une fois le plutonium extrait, il fallut apprendre à le mettre sous forme de métal très pur pour fabriquer la bombe, travail très délicat et dangereux si des précautions précises ne sont pas assurées : le plutonium est extrêmement toxique par ingestion et mortel si l'organisme en fixe moins d'un centième de milligramme. Or, ce sont des kilogrammes de métal qui sont nécessaires pour réaliser une bombe.

Un contrôle et une surveillance médicale considérables étaient exercés sur les travailleurs dont les vêtements et les mains étaient lavés chaque jour à la sortie des lieux de travail, et qui étaient munis d'instruments permettant de mesurer la dose quotidienne de rayonnement reçue par chaque individu. Le service de santé avait le droit d'arrêter (comme il l'a aujourd'hui dans de tels laboratoires) toute opération en cours, quelle qu'en fût l'importance.

Par ailleurs, à Oak-Ridge, se montaient d'immenses usines de séparation isotopique. Pour séparer l'uranium 235 de son isotope plus abondant l'uranium 238, il faut, en raison de la quasi-identité des propriétés physicochimiques de ces deux isotopes, avoir recours à des procédés de fractionnements successifs, qui, lentement, enrichissent le mélange en isotope rare, et rejettent l'excès d'isotope abondant.

Plusieurs méthodes, de principes connus, qui avaient permis avec peine d'obtenir, dès 1941, quelques fractions de milligramme d'uranium 235, furent mises en œuvre en Amérique sur une échelle assez large pour aboutir en 1945 à en produire des kilogrammes.

L'une des méthodes utilisées avec succès dans l'usine d'Oak-Ridge, abritée dans une suite de bâtiments de trois kilomètres de périmètre, est la méthode dite de diffusion gazeuse [3] qui utilise l'hexafluorure d'uranium seul

3. Le principe en est le suivant : quand un mélange de gaz est pompé à travers une paroi poreuse, le gaz dont les molécules sont les plus légères passe un peu plus facilement que le gaz lourd. L'enrichissement après un seul passage de l'hexafluorure d'uranium 235 est si faible qu'il faut plusieurs milliers d'opérations successives de diffusion à travers des parois poreuses contenant

composé gazeux mais malheureusement très corrosif de cet élément, et comporte quatre mille opérations successives. Pour faire fonctionner le nombre considérable de pompes nécessaires mises en jeu, il fallut construire une centrale électrique d'une puissance de près de trois cent mille kilowatts.

Une autre méthode, celle de la séparation électromagnétique, exigea la construction d'un si grand nombre d'électro-aimants, que la quantité d'acier mise en œuvre fut du même ordre de grandeur que celle nécessaire à la construction d'une flotte de guerre moyenne. Par ailleurs, la confection des circuits électriques des électro-aimants nécessita l'emploi d'une grande fraction de la réserve d'argent métallique de la Banque Fédérale des États-Unis : quatorze mille tonnes de ce métal, valant plus de deux cent milliards d'anciens francs.

L'atmosphère de travail dans ces usines était extraordinaire. Tout le monde se sentait engagé dans une entreprise d'une importance considérable, mais n'en savait pas plus. Dans le procédé électromagnétique, la surveillance de chaque séparateur et des multiples cadrans qui permettaient de contrôler son fonctionnement avait été confiée à des jeunes filles du Tennessee. Celles-ci, après une période d'apprentissage, manœuvraient l'appareil mieux que les scientifiques qui l'avaient conçu, de la même manière qu'il est possible de conduire une automobile et d'apprécier ses réactions sans comprendre le fonctionnement détaillé de son moteur.

Los Alamos était plus étrange encore, situé à près de deux mille mètres d'altitude sur un magnifique plateau isolé au sein du Nouveau-Mexique, sorte de paradis où vivaient enfermés plus d'un millier de savants et leur famille, c'est là que se décidait le sort de toute l'entreprise. C'est le jeune théoricien Robert Oppenheimer qui en portait la responsabilité. Plein de charme, extraor-

un nombre considérable de pores infiniment petits, suivies de stades de recompression, pour arriver à obtenir l'hexafluorure d'uranium 235 presque pur.

dinaire meneur d'hommes, il avait réuni autour de lui une pléiade de mathématiciens, de physiciens, de spécialistes de la métallurgie fine, et ceux de la balistique. Il fut l'inspirateur des études théoriques et pratiques qui aboutirent à la réalisation d'une des étapes les plus difficiles du problème à résoudre et dont les détails sinon les principes sont encore secrets aujourd'hui : celle du mécanisme même de fonctionnement de la bombe.

La difficulté consiste dans la nécessité de rassembler, à partir de masses ou de volumes sous-critiques, la substance fissile en une masse surcritique, dans un temps suffisamment court pour qu'il ne se produise pas de fission, et par conséquent d'explosion prématurée, avant que l'assemblage soit définitif.

L'opération est encore plus difficile avec le plutonium qu'avec l'uranium 235, car au fur et à mesure de sa production dans la pile, le plutonium 239 se transmute partiellement en un autre isotope du plutonium de masse 240 dont la présence constitue un danger pour les usages militaires du fait qu'il a une tendance spontanée à la fission et que les neutrons émis ainsi augmentent les chances d'allumage prématuré de l'engin.

Aussi bien pour la bombe à uranium 235 que pour la bombe à plutonium, l'obtention de la masse critique en un temps extrêmement court se fait en mettant en jeu des explosifs courants. Un des systèmes consiste à réunir dans un tube analogue à une bouche à feu classique les deux masses sous-critiques. L'une des masses est projetée par une charge d'explosif dans la masse située à l'autre extrémité du tube et creusée d'une cavité pour recevoir la première. Une autre solution met en jeu le dispositif dit d'implosion par charges creuses qui permet de concentrer les effets de plusieurs masses d'explosifs en un seul foyer et d'écraser une sphère creuse, de plutonium par exemple, sous-critique par sa configuration géométrique, pour en faire une sphère pleine dépassant la masse critique dans un espace de temps encore plus court [4].

4. Pour démarrer la réaction explosive à l'instant exact où la masse surcritique est obtenue, il est utile de disposer d'une amorce constituée par un dispositif qui donne brusquement un

Il est facile de comprendre que la complexité de ces mécanismes fait de la bombe atomique un engin extrêmement délicat dont le rendement exact, c'est-à-dire le rapport de la masse de la substance fissile ayant subi la fission à la masse initiale, peut varier pour un modèle déterminé dans des limites très larges.

Le succès de l'équipe Oppenheimer est d'avoir non seulement réussi à trouver les solutions pour l'uranium 235 et le plutonium, mais d'avoir pu aussi réduire le volume des systèmes nécessaires pour les rendre transportables dans une super-forteresse, le grand avion de bombardement de la fin de la guerre. Vers le mois d'avril 1945, il parut certain que la bombe pourrait être faite et fonctionnerait, bien que le métal destiné au premier engin ne puisse être prêt qu'au début de juillet.

En juin 1945, peu de semaines avant l'essai du Nouveau-Mexique, le général Groves vint à l'usine de séparation isotopique d'Oak-Ridge et, réunissant le personnel, lui demanda (en vue d'un objet qu'il leur dit être d'extrême importance pour rapprocher la fin de la guerre) de doubler la production dans les deux semaines suivantes. Par moments, certaines des opératrices sanglotaient d'énervement, à force de s'être appliquées jour et nuit à maintenir les aiguilles des cadrans aux positions optima, mais à quatorze heures près, le but fut atteint.

Le jour de l'essai, une centaine de savants étaient rassemblés à Alamagordo, dans le désert du Nouveau-Mexique. Des fuites semblent avoir eu lieu à Los Alamos, car le 15 juillet à onze heures du soir, comme des ombres coupables, plusieurs centaines d'habitants se mettaient à grimper sur les hauteurs pour apercevoir de loin le désert et l'explosion qui devait avoir lieu le 16 à quatre heures du matin. A cinq heures, rien ne s'étant produit, découragés, persuadés que la montagne avait accouché d'une souris, les habitants de Y redescendaient vers la ville. Quelques minutes plus tard, le ciel s'embrasait. Ils avaient manqué

jet, une bouffée de neutrons; enfin, il y a intérêt à ce que les masses critiques restent accolées ensemble le plus longtemps possible, pendant une durée de l'ordre du millionième de seconde, en les plaçant à l'intérieur d'une enveloppe très lourde qui s'oppose par son inertie à l'expansion trop rapide de la masse fissile.

le spectacle, mais ils savaient qu'ils n'avaient pas quitté pour rien depuis deux ans le reste du monde.

L'effort anglo-canadien.

Après la dissolution du MAUD Committee en 1941 et une offre de la plus grande firme chimique britannique de reprendre l'entreprise à ses frais, l'effort anglais fut confié au D. S. I. R. (Department of Scientific and Industrial Research) sous la haute direction de Sir John Anderson, à cette époque Lord President du Conseil. Pour des raisons de sécurité, l'organisation prit le nom de « Directorate of Tube Alloys » (alliages pour tubes).

Pendant l'été 1942, il fut décidé de transférer au Canada l'équipe qui s'était formée autour d'Halban et de Kowarski et qui s'occupait de la pile à eau lourde. On pensait ainsi éviter les difficultés matérielles qui, en Angleterre, retardaient le travail, et aussi favoriser par la proximité géographique les relations avec l'entreprise américaine.

Dès mars 1943, un laboratoire était installé à Montréal, mais ses travaux furent au début ralentis par des difficultés politiques qui interrompirent pendant plusieurs mois les relations anglo-américaines en ce domaine.

Finalement, à la Conférence de Québec en août 1943, il fut décidé qu'il y aurait collaboration complète pour tout ce qui concernait directement la poursuite de l'effort de guerre. Grâce à cette décision, à partir de la fin de l'été 1943, les meilleurs physiciens d'Angleterre (dont certains pouvaient alors se libérer du problème du radar), Oliphant, Chadwick, Frisch, Peierls furent chargés de postes importants dans les différentes sections de l'entreprise américaine, en particulier à Berkeley, à Oak-Ridge et à Los Alamos.

La collaboration dans le domaine des piles à eau lourde entre les groupes de Chicago et de Montréal reprit en janvier 1944 et il est caractéristique que la grande réunion scientifique, liée à la reprise des contacts, qui groupait vingt-quatre techniciens des équipes américaines et anglo-canadiennes, comportait des ressortissants de treize nationalités d'origines différentes. Ceci témoignait de la généreuse et intelligente attitude des pays anglo-saxons envers

les victimes du nazisme et le succès des recherches atomiques en fut une des récompenses.

Il fut alors décidé de construire une grande pile à eau lourde au Canada, dans un effort commun anglo-canadien et américain. L'eau lourde, plusieurs tonnes, et l'uranium métal, furent fournis par les U. S. A. et la pile fut construite à partir de 1945 dans un site isolé magnifique, à Chalk River, à deux cents kilomètres à l'ouest d'Ottawa, au bord de la rivière du même nom. J'y ai assisté à la passionnante entreprise de la création, dans une forêt de pins et de bouleaux, d'une ville qui compte aujourd'hui cinq mille habitants.

L'équipe anglo-canadienne fut d'abord dirigée par Hans Halban, pionnier de l'effort français qui fut remplacé en mai 1944 par Sir John Cockcroft, un des réalisateurs du radar anglais. Outre Halban, l'équipe comprenait comme Français, Pierre Auger, Jules Guéron, Lew Kowarski et moi-même, qui tous les quatre devions revenir en France en 1946 pour participer à la création du Commissariat à l'Énergie Atomique. Auger dirigeait la physique, Kowarski fut responsable de la construction de la première petite pile canadienne à eau lourde, première pile à fonctionner dès l'été 1945 en dehors des États-Unis, tandis que Guéron et moi occupions des postes dirigeants dans le secteur chimique.

Les travaux de chimie effectués à Montréal revêtirent une certaine importance : la séparation du plutonium de l'uranium et des produits de fission y fut étudiée en utilisant la solubilité de certains de leurs sels dans des solvants organiques. Une recherche systématique fut entreprise pour sélectionner les meilleurs parmi trois cents solvants organiques disponibles commercialement aux États-Unis; une demi-douzaine de ceux-ci furent retenus, l'un d'eux fut ainsi mis en jeu au Canada, un autre plus tard au Royaume-Uni et un troisième indépendamment aux U. S. A. Il n'y avait pas de meilleur solvant, disait-on alors, le meilleur étant celui que l'on connaît et sait utiliser le mieux. Quatre ans plus tard, un solvant véritablement meilleur que les autres fut découvert aux États-Unis et est aujourd'hui la base du procédé employé dans toutes les grandes usines d'extraction de plutonium; il

n'était pas disponible commercialement lors de notre commande d'ensemble aux U. S. A., et nous avait échappé, démontrant ainsi les aléas d'une telle recherche appliquée.

Un autre travail de chimie entrepris à Montréal devait aboutir pendant l'année 1945 à la séparation d'un milligramme d'un isotope radioactif artificiel à vie longue de l'uranium, l'uranium 233, formé dans le bombardement du thorium par neutrons; Seaborg l'avait découvert quelques années auparavant et avait montré qu'il pouvait aussi subir la fission. Après quelques mois d'études sur ce précieux milligramme, on trouva brusquement qu'il en manquait environ un cinquième dont aucun de ceux qui l'avaient manipulé ne pouvait expliquer la disparition. Il fallut donc prévenir de cette perte le directeur du laboratoire, Sir John Cockcroft, qui n'en fut pas spécialement ému, car il savait cet échantillon déjà à Moscou, après avoir été détourné par Alan Nunn May, un des physiciens anglais de l'équipe, le premier espion atomique, qui venait d'être dénoncé par un employé de l'ambassade d'U. R. S. S. à Ottawa.

Les mesures de protection du secret n'avaient toutefois pas été moins strictes au Canada qu'aux États-Unis et la tâche des agents de sécurité était infinie; l'un d'eux, affolé, rapporta un jour qu'il avait entendu dans un tramway de Montréal deux étudiants discuter à haute voix de plutonium; l'enquête faite montra, à la satisfaction générale, qu'il avait mal entendu et confondu le nom de « polonium », élément radioactif classique avec celui du nouvel élément secret.

Le polonium devait d'ailleurs jouer un rôle dans la réalisation même de la bombe et en 1943 je fus envoyé à New York pour en extraire, à partir d'une vieille source de trois grammes de radium de l'hôpital du cancer; la manipulation permit d'obtenir la plus forte quantité de polonium isolée à cette date; elle fut envoyée à Los Alamos, où elle était attendue avec impatience, mais non sans transiter sur territoire canadien où se fit la cession pour bien montrer qu'il s'agissait d'une contribution de l'équipe britannique.

L'échec allemand.

C'est seulement après l'occupation de l'Allemagne que l'on se rendit compte que, dans la course atomique, les Allemands étaient de plusieurs années en retard, contrairement aux craintes couramment éprouvées dans les pays anglo-saxons.

S'ils avaient envisagé la construction de génératrices d'énergie, les Allemands comme les Français avaient considéré comme irréalisable l'idée de fabriquer en quelques années une bombe atomique et y avaient renoncé, et ceci non pas par des scrupules moraux, comme on a depuis parfois cherché à le faire croire. Ils n'arrivèrent même pas d'ailleurs à construire une simple pile atomique comme celles que les Américains avaient réalisées à la fin de 1942, et ils ignoraient aussi l'existence du plutonium.

Dès 1939, des physiciens avaient formé une société de l'uranium comprenant en particulier les savants Werner Heisenberg et Walther Bothe. A la déclaration de guerre, beaucoup de scientifiques furent mobilisés, d'autres, comme Otto Hahn, l'auteur principal de la découverte de la fission, hostiles au régime, évitèrent de poursuivre le travail dans le domaine de la fission auquel, en tout état de cause, le gouvernement ne donna pas la priorité voulue. Plusieurs groupes furent formés : l'un d'eux sous l'égide du ministère des Postes fut confié au baron Manfred von Ardenne, homme d'affaires et physicien de talent qui possédait un grand laboratoire privé.

En 1942, le maréchal Hermann Gœring prit la haute direction de l'entreprise qui, effectivement dirigée par le physicien Walter Gerlach, continua à être mal organisée, la liaison entre les divers groupes constituants étant anarchique. En tout, une centaine à peine de savants et d'ingénieurs travaillèrent par petits groupes et le budget total n'atteignit que dix millions de dollars (un demi pour cent de la dépense américaine).

L'usine de production d'eau lourde norvégienne, sur laquelle on fondait de grands espoirs, fut détruite à deux reprises. La première fois, par un sabotage exécuté par des commandos parachutés et des patriotes norvégiens, la seconde fois après réparation du premier désastre, par un

bombardement aérien. Après ces deux échecs, la fabrication fut abandonnée jusqu'à la fin de la guerre. En revanche, la production d'uranium métal fut mise au point à l'échelle industrielle.

Les Allemands ne prenaient même pas d'extrêmes précautions pour garder le secret de leur effort, et les lettres envoyées à Gerlach le qualifiaient de « plénipotentiaire pour la physique nucléaire du maréchal du Reich ». Néanmoins, les Alliés n'avaient pas réalisé avant l'invasion de l'Europe le manque de portée de l'effort allemand, surtout en raison des essais de production d'eau lourde. Cette ignorance fut à l'origine d'un facteur important du développement de l'effort américain, dont l'ampleur initiale fut fortement influencée par la crainte que l'ennemi ne devançât les Alliés. Au contraire, les Allemands avertis de l'importance des travaux américains ne les prirent pas très au sérieux, croyant y voir essentiellement une prise de position pour l'après-guerre.

A la fin de 1944, malgré la destruction de plusieurs de leurs laboratoires, les savants allemands conclurent qu'une machine à eau lourde pourrait marcher. Gerlach en avertit Martin Bormann, l'adjoint d'Hitler. Peu après, les S. S. firent courir le bruit que l'Allemagne était à la veille d'avoir une bombe à uranium, bien qu'ils fussent à des années de la réaliser. Au moment de la débâcle, un vain effort fut fait pour concentrer les savants dans le réduit bavarois, mais l'effondrement fut trop rapide. Néanmoins, les techniciens allemands, jusqu'au bout, crurent à leur avance. Certains d'entre eux avaient même l'espoir de faire jouer leurs connaissances en la matière pour adoucir les conditions de paix faites à leur pays. Ce ne fut qu'après l'usage de la bombe par les Alliés qu'ils comprirent leur retard. L'Allemagne avait non seulement perdu la guerre, mais aussi la lutte sur le plan scientifique dans le domaine de la physique nucléaire d'où elle avait chassé ses plus grands spécialistes.

Premières décisions politiques.

L'étonnante création en trois ans, moyennant une dépense de deux milliards de dollars, du complexe atomique américain de laboratoires et d'usines ayant la

même importance que l'industrie nationale automobile à cette date, n'avait été possible que grâce à la réalisation d'une excellente coordination gouvernementale en temps de guerre entre la science, l'industrie et l'armée, coordination que les États-Unis semblent avoir eu récemment, en temps de paix, plus de difficultés à établir dans le domaine des fusées interplanétaires et des engins balistiques. La réussite américaine bénéficia de la science européenne à la fois par suite de l'afflux de savants qui avaient fui les régimes fascistes et les persécutions antisémites, et du fait de l'importante collaboration avec les scientifiques britanniques.

En 1941, les savants britanniques avaient pesé sur la décision américaine de se lancer dans la grande entreprise, et pendant l'année 1942, la communication des renseignements fut complète entre savants américains et britanniques. J'en eus moi-même la preuve pendant l'été 1942 où je travaillais pour le compte du gouvernement anglais dans l'équipe américaine du Metallurgical Project à Chicago; les portes m'avaient été, en effet, largement ouvertes, en particulier dans un des domaines les plus secrets, celui de l'extraction du plutonium.

Le succès des recherches en cours et de la première réaction en chaîne dans la pile de Fermi en décembre 1942 convainquit les dirigeants américains que les États-Unis allaient avoir en main une arme qui leur permettrait non seulement de gagner la guerre, mais aussi de diriger la paix qui suivrait. Dès janvier 1943, le gouvernement américain fit connaître au gouvernement britannique son intention de cesser la collaboration dans le domaine atomique, manifestant ainsi pour la première fois la politique d'isolationnisme atomique qu'il adopta par la suite.

L'importance attribuée par les Anglais au problème des brevets nucléaires, le rôle considérable joué jusque-là dans leur organisation atomique par des représentants d'une grande firme privée, et enfin la non-participation de ses plus grands physiciens avaient sans doute aussi nui alors au gouvernement britannique.

Pour l'équipe anglo-canadienne qui venait d'être installée au Canada, afin de faciliter les relations avec les travailleurs américains, la décision qui la condamnait à une

inactivité partielle était un coup sérieux que les derniers renseignements obtenus de Chicago juste avant l'arrêt de la collaboration ne parvenaient pas à compenser.

Pendant toute l'année 1943, Churchill s'efforça de faire revenir le gouvernement américain sur sa décision, en arguant que la collaboration devait exister dans la recherche atomique comme dans tous les autres domaines de l'effort commun, quelles que soient les proportions relatives de la contribution des deux partenaires, comme cela était le cas pour l'aviation où le Royaume-Uni se spécialisait dans les chasseurs et les États-Unis dans les bombardiers. Successivement pendant les Conférences de Casablanca, de Washington et de Québec, Churchill insista énergiquement auprès de Roosevelt pour le rétablissement de la collaboration, il eut finalement gain de cause, et un accord de collaboration atomique, le premier de son genre, et sans doute le plus important jusqu'à ce jour, fut signé à Québec en août 1943 entre les gouvernements américain, anglais et canadien. Cet accord n'a été publié qu'en 1954; il donnait au gouvernement anglais pendant la durée de la guerre une participation totale aux domaines où sa contribution pouvait servir à l'effort militaire commun, ainsi qu'un droit de veto dans l'utilisation de l'arme future.

Une interprétation trop stricte de la première clause s'opposa à ce que la collaboration reprenne dans le secteur de l'extraction du plutonium, les responsables américains soutenant le point de vue que, les plans de l'usine de Hanfort entièrement commandée à distance étant définitivement établis, une aide britannique ne pourrait y être d'aucun secours pour l'effort de guerre.

Il en résulta que l'équipe anglo-canadienne dut dès 1944 s'attaquer au problème du traitement des barres d'uranium irradiées en partant des travaux de 1942 de l'équipe de Chicago, à laquelle j'étais le seul au Canada à avoir participé avant l'arrêt de la collaboration anglo-amériraine. Nous réussîmes ainsi à mettre sur pied en 1945, à Montréal, le nouveau procédé d'extraction du plutonium par solvants organiques, démontrant ainsi pour la première fois en cette matière l'inefficacité de la politique du secret.

Parallèlement à l'accord de Québec, fut conclue entre

ses signataires une entente sur l'approvisionnement en matières premières qui a duré jusqu'à ce que la pléthore d'uranium en 1961 la rende inutile; elle a donné aux pays anglo-saxons pendant de nombreuses années un véritable monopole sur les grandes sources d'uranium du monde occidental; cette entente fut concrétisée par la création d'une agence d'approvisionnement, la « Combined Development Agency » qui avait pour rôle d'acheter tout l'uranium disponible et de le répartir entre Américains et Anglais, leur évitant ainsi une concurrence sur les marchés étrangers; peu après, en 1944, cet organisme signait avec le gouvernement belge en exil et la compagnie productrice un contrat exclusif qui, assurant à ses bénéficiaires la totalité de la production du minerai du Congo, le plus riche du monde, représenta jusqu'en 1954 la principale source d'uranium des deux pays anglo-saxons.

L'accord de Québec était accompagné de certaines restrictions dans le domaine des applications pratiques. En raison de l'ampleur de l'effort américain, il y était précisé que le Premier Ministre anglais s'en remettait au Président des États-Unis pour décider après la guerre quelle serait la part que l'Angleterre recevrait des données qui pourraient être utilisées pour les applications industrielles de l'énergie atomique. L'accord assura néanmoins aux savants britanniques une participation entière à la réalisation de l'arme atomique proprement dite et la connaissance à la fin de la guerre du détail de la mise en œuvre et du fonctionnement de la bombe.

Dans l'ensemble, la contribution scientifique britannique, épaulée par l'apport français dans le domaine des piles atomiques, fut très importante, bien que l'Angleterre ait peu participé à l'effort de réalisation technique proprement dit, les dépenses américaines et anglaises ayant été dans un rapport d'environ cent à un. Mais les Anglais ne furent pas vraiment traités par les Américains comme des partenaires atomiques égaux. Jouant un peu le rôle de parents pauvres, ils s'en tirèrent néanmoins bien, finissant la guerre au courant de presque toutes les données du développement atomique américain.

En revanche, la petite équipe française qui travaillait dans le groupe anglo-canadien ne participait qu'aux pro-

blèmes concernant les piles atomiques et la production du plutonium, mais elle connaissait de l'arme à venir son importance redoutable. C'est pour cela que nous prîmes l'initiative, Pierre Auger, Jules Guéron et moi-même, en juillet 1944, de prévenir le général de Gaulle lors de sa visite à Ottawa des conséquences de ce nouvel élément de la politique mondiale, ceci un an avant son utilisation.

Il était impératif à notre avis, en ces jours encore difficiles pour notre pays, que le général de Gaulle fût mis au courant de l'importance de l'affaire. Nous souhaitions qu'il puisse à la fois tenir compte à l'avance de l'avantage considérable que représenterait pour les États-Unis l'éventuelle possession de l'arme nouvelle, prendre en France les mesures nécessaires à une rapide reprise des recherches atomiques et enfin connaître l'intérêt des ressources en uranium de Madagascar, auxquelles nous attribuions alors une importance qui se révéla par la suite très exagérée.

Comme la France, l'Union Soviétique n'avait pas été tenue officiellement au courant des recherches atomiques des alliés anglo-saxons. Il y avait bien eu au début de l'année 1943 une ébauche de négociation destinée à mettre sur pied une collaboration entière dans le domaine des recherches scientifiques et techniques de guerre, entre les États-Unis et la Grande-Bretagne d'une part, et l'Union Soviétique d'autre part. Cette négociation échoua, et de ce fait il n'y eut, pendant la guerre, de collaboration scientifique entre la recherche anglo-américaine et la recherche soviétique dans aucun domaine, y compris bien entendu, celui de l'énergie atomique.

Les savants soviétiques n'ignoraient naturellement pas le problème de l'uranium. Des communications faites en 1941 à l'Académie des Sciences de l'U. R. S. S., parvenues aux États-Unis au cours de l'année suivante, montrent que les conséquences de la découverte de la fission et ses diverses applications avaient bien été prévues par quelques savants soviétiques; ceux-ci en évaluaient à la fois l'importance et la difficulté de réalisation, et ils suppliaient leur gouvernement de se lancer dans l'étude de ce problème, de façon à éviter d'être dépassés par d'autres pays.

Dès le printemps 1940, un comité spécial sur le problème de l'uranium avait été établi sous l'égide de l'Académie des Sciences soviétique et des crédits étaient consacrés à la prospection de l'uranium. L'invasion de l'U. R. S. S. par l'armée allemande arrêta ces travaux dès juin 1941, et les savants nucléaires soviétiques furent dispersés et affectés à des projets de recherche plus urgents. L'activité des laboratoires de physique nucléaire ne reprit qu'en 1943, après la victoire de Stalingrad, mais le programme resta à une échelle réduite jusqu'à la fin des hostilités.

L'utilisation de la bombe.

En 1942, deux armes atomiques étaient à l'étude : la bombe et les poisons radioactifs. En effet, la dispersion sur une ville de sous-produits radioactifs provenant d'une pile pourrait rendre son évacuation inévitable sous la menace en quelques heures d'une irradiation mortelle pour ses habitants. Quand l'armée américaine prit l'affaire en main, il fut décidé que seule l'étude de la bombe serait poursuivie, les poisons atomiques paraissant tomber directement sous le coup de la convention de Genève sur les gaz de combat.

Ce scrupule des militaires paraît aujourd'hui surprenant eu égard aux effets des armes atomiques, car si les uns se manifestent au moment même de l'explosion, liés au souffle, à la chaleur intense de la boule de feu, aux rayonnements émis pendant la réaction nucléaire, les autres non moins meurtriers sont retardés et liés à la radioactivité des produits de fission pouvant retomber sur la région bombardée.

Ce n'est qu'en avril 1945 qu'il apparut comme certain que la bombe atomique allait pouvoir fonctionner; le Président Roosevelt était mort le 12 du même mois, et la responsabilité de l'emploi de la bombe fut prise par le Président Truman, mis au courant du problème le 25 avril 1945 seulement.

Six semaines avant l'essai de la bombe au Nouveau-Mexique, le grand précurseur scientifique Szilard, qui avait alerté le Président Roosevelt en 1939, avait remis au secrétaire d'État James Byrnes un mémorandum

initialement destiné à Roosevelt. Ce mémorandum de mars 1945 expose avec une remarquable vue de l'avenir les conséquences de la bombe atomique sur la future position internationale des États-Unis, en particulier vis-à-vis de la Russie soviétique, et montre le danger d'une course aux armements atomiques où les U. S. A. auraient en peu d'années non seulement perdu leur avance, mais encore perdu leur prédominance en raison de leur très grande vulnérabilité à une attaque atomique par suite de la concentration industrielle et humaine dans leurs grandes villes. Szilard affirme que seul un accord international de contrôle pourrait éviter la course aux armements et la guerre destructrice qui risquerait de sortir de la peur mutuelle de deux grands pays possesseurs d'armes atomiques. Ce contrôle devrait s'appliquer à toute la future industrie mondiale de production d'énergie atomique utilisable. Szilard envisage aussi l'hypothèse d'une renonciation universellement consentie à l'utilisation de l'uranium comme source d'énergie, le contrôle se limitant alors aux seules sources de matières premières.

Quelques semaines plus tard, en juin 1945, un groupe de savants présidé par le physicien d'origine allemande James Franck remet au secrétaire d'État à la guerre un rapport reprenant les arguments de Szilard, prédisant la courte durée du monopole américain, et proposant la révélation au monde des dangers de l'arme nouvelle par une démonstration au-dessus d'une zone inhabitée, en présence de représentants de toutes les Nations Unies. Ceci, de façon à éviter la perte possible de prestige américain susceptible de résulter de l'emploi d'une arme si destructrice et le risque de voir les États-Unis mal placés ensuite devant l'opinion mondiale pour s'ériger en champions du contrôle international de la force nouvelle qu'ils auraient déchaînée.

Le préambule du rapport Franck expose clairement pour la première fois le nouveau rôle politique qui échoit au savant nucléaire : « Les savants intéressés ne prétendent pas parler avec autorité des problèmes de politique nationale ou internationale. Toutefois, nous nous sommes trouvés depuis cinq ans, par la force des événements, dans la position d'une petite minorité de citoyens

au courant d'une menace grave pour la sécurité de ce pays et de toutes les autres nations, menace dont le reste de l'humanité est inconsciente. Nous croyons donc qu'il est de notre devoir d'insister d'une façon pressante pour que l'on comprenne toute la gravité des problèmes résultant de la libération de l'énergie nucléaire et que l'on prenne des mesures appropriées pour leur étude et pour la préparation des décisions nécessaires. »

Malgré ces tentatives dont l'influence sur le Président Roosevelt, au courant du problème depuis plusieurs années, aurait peut-être été plus grande, une décision préliminaire d'utiliser l'arme au Japon fut prise le 1er juin, après la fin de la guerre avec l'Allemagne, par un Comité présidé par le ministre de la Guerre Stimson, conseillé par quelques-uns des savants responsables, dont Compton, Fermi, Lawrence et Oppenheimer. La décision finale ne fut adoptée qu'après la Conférence de Potsdam, et le refus du 28 juillet 1945 du Japon d'accepter la reddition sans conditions. Staline avait été prévenu quelques jours auparavant de l'existence d'une arme nouvelle d'une puissance extraordinaire, mais non de l'intention de l'employer immédiatement. Que se serait-il passé si la bombe avait été prête avant la fin de la guerre avec l'Allemagne? La vengeance de Pearl Harbour aurait sans doute eu lieu d'abord, suivie d'un temps d'arrêt pour permettre à Hitler d'accepter la reddition inconditionnelle dont le refus aurait alors entraîné l'emploi de l'arme nouvelle sur l'Allemagne.

A Hiroshima et Nagasaki, l'homme a su pour la première fois créer un désastre atteignant l'ordre de grandeur des grands cataclysmes naturels. La catastrophe de Saint-Pierre à la Martinique en 1902, détruite en un instant avec ses vingt-six mille habitants par l'élévation de température intense provoquée par la nuée ardente de la montagne Pelée et ne laissant qu'un seul survivant, un prisonnier dans une cave, ressemble étrangement à l'annihilation d'une ville par une explosion atomique. De même le plus grand cataclysme de ce siècle, qui prit place aussi au Japon, fut le tremblement de terre de 1924, qui fit cent quarante mille morts, autant qu'à Hiroshima, et fut la cause d'un extraordinaire élan de solidarité internationale.

Il a été dit par le physicien anglais Patrick Blackett que l'utilisation de la bombe n'a pas tant été le dernier acte militaire de la Deuxième Guerre mondiale que le premier acte voulu de la guerre froide avec l'Union Soviétique. Cette interprétation est inexacte et la décision d'utilisation s'explique en fait par un ensemble complexe de raisons, dont certainement celle de terminer la guerre au plus vite était primordiale.

Il n'en reste pas moins qu'on a dû rarement observer dans l'histoire du monde un changement aussi brusque dans l'équilibre des forces. L'U. R. S. S. se trouvait alors avoir l'armée de beaucoup la plus forte d'Europe, et ses dirigeants pouvaient espérer que l'entrée en guerre de leur pays contre le Japon, conformément à leur promesse donnée à Téhéran, allait leur permettre de prendre part à la lutte finale et probablement de participer à l'occupation du Japon déjà presque hors de combat.

Brusquement, les États-Unis furent à même d'achever seuls la guerre avec le Japon, et ils allaient disposer pendant plusieurs années d'une puissance militaire inégalable. Pour la Russie soviétique, ce renversement des forces allait être sans doute en partie responsable de la méfiance qui devait caractériser son attitude dans les négociations internationales, dans la période qui suivit la guerre.

3.

La période du monopole atomique américain.

1945-1949.

Tandis que l'extraordinaire essor de la science et de l'industrie au début du XXe siècle a été caractérisé par une très grande liberté de circulation des connaissances scientifiques ainsi que des matières premières, au contraire des restrictions à ces mêmes libertés, conséquences de l'existence de l'arme atomique, font de la fission de l'uranium un domaine à part, exceptionnellement soumis à l'influence de la politique internationale.

La réussite de l'entreprise atomique américaine pendant la guerre a donné aux U. S. A. une avance sur le reste du monde et au gouvernement américain le rôle dirigeant dans la politique atomique internationale. La ligne de conduite des États-Unis a été inspirée par le désir de conserver leur avance, de rester le plus longtemps possible les seuls possesseurs de la bombe atomique et surtout de limiter au maximum le nombre de pays disposant de l'arme nouvelle. En pratique, en accord avec ses alliés anglo-saxons, le gouvernement américain s'est efforcé de limiter le commerce des matériaux nucléaires et de maintenir secrètes dans une première période qui a duré jusqu'en 1955 les connaissances scientifiques, industrielles et militaires, puis essentiellement les données militaires après 1955.

Élaboration de la politique du secret.

Le 6 août 1945, sur le navire de guerre qui le ramène de la Conférence de Potsdam, le Président Truman annonçait l'oblitération d'Hiroshima par une bombe atomique équivalente à vingt mille tonnes de trinitrotoluène. Il ren-

dait publique l'intention de son pays de ne pas divulguer le détail des procédés techniques qui avaient conduit à la réalisation de l'arme.

Trois jours plus tard, dans un nouveau discours, le Président Truman expliquait comment les Alliés s'étaient embarqués dans l'immense effort de fabrication de la bombe avec la hantise que les Allemands pourraient les y devancer et il en excusait l'utilisation par le fait qu'elle avait raccourci la durée de la guerre avec le Japon et sauvé des milliers de vies américaines qui auraient été perdues dans le débarquement prévu pour l'automne 1945. Il exposait la responsabilité qui allait incomber aux U. S. A. dans les termes suivants, qui annoncent le monopole :

« Nous devons nous constituer les gardiens de cette nouvelle force afin d'empêcher son emploi néfaste et afin de la diriger pour le bien de l'humanité.

« C'est une terrible responsabilité qui nous est échue.

« Nous remercions Dieu qu'elle soit venue à nous plutôt qu'à nos ennemis et nous prions pour qu'Il nous guide pour l'utiliser dans Ses voies et pour Ses buts. »

Toutefois, en contradiction avec la politique envisagée, le 16 août 1945 le ministère de la Guerre publia un document, le « rapport Smyth », consacré à l'histoire de la grande réussite scientifique et technique du Manhattan District. Ce rapport de près de deux cent cinquante pages montre les grandes lignes de l'effort américain, décrit les principes des voies qui furent explorées, puis abandonnées, comme ceux des méthodes qui furent mises au point avec succès, insistant même sur certains points de détail qui furent particulièrement difficiles à résoudre. Ce document fut préparé dans les derniers mois de la guerre, sans consultation des gouvernements alliés britannique et canadien; il avait pour but de délimiter le domaine des connaissances non secrètes, mais correspondait sans doute aussi à un besoin de l'armée de faire mieux connaître l'ampleur de la tâche accomplie sous sa direction et d'en justifier le coût considérable.

Les renseignements contenus dans cet ouvrage allaient notablement faciliter l'effort à réaliser par l'Union Soviétique pour reproduire les résultats atteints en Amérique, tandis qu'ils contribuaient à renforcer la notion de

l'avance des États-Unis aux yeux du public américain.

La politique du secret fut définitivement adoptée le 15 novembre 1945 par le Président Truman et les Premiers Ministres canadien et britannique, Mackenzie King et Attlee, au cours d'une réunion à la Maison-Blanche à Washington; ils y firent une déclaration solennelle où ils étudiaient la possibilité de prendre des mesures d'ordre international, pour empêcher l'emploi de l'énergie atomique à des fins de destruction et pour faire servir les progrès scientifiques à venir à des fins pacifiques et humanitaires.

Ils justifiaient l'adoption de leur politique dans les termes suivants : « Nous nous rendons compte que la seule protection absolue du monde civilisé contre l'emploi funeste des connaissances scientifiques consiste à éviter la guerre. Aucun système de sauvegarde qu'on puisse imaginer ne saurait de lui-même garantir le monde contre la production d'armes atomiques par une nation résolue de recourir à l'agression.

« Nous avons étudié l'opportunité de révéler tous les détails scientifiques concernant l'application industrielle pratique de l'énergie atomique. L'exploitation militaire de l'énergie atomique repose, en grande partie, sur les mêmes méthodes et procédés de transformation qu'exigent les applications industrielles.

« Nous ne sommes pas convaincus que la divulgation des renseignements spéciaux concernant l'application pratique de l'énergie atomique avant qu'on ait pu imaginer un système de sauvegarde acceptable pour toutes les nations, efficace, réciproque et qu'on puisse faire respecter, contribuerait à la solution pratique du problème de la bombe atomique. Nous croyons, au contraire, qu'elle pourrait produire l'effet opposé. Nous sommes, toutefois, disposés à partager avec les autres Nations Unies, sous réserve de réciprocité, tous les renseignements concernant l'application industrielle pratique de l'énergie atomique dès qu'on aura pu trouver des sauvegardes efficaces et qu'on peut faire appliquer contre l'emploi qu'on pourrait faire de cette énergie à des fins de destruction.

« Afin d'acquérir le moyen le plus efficace d'éliminer entièrement l'usage de l'énergie atomique pour des fins

de destruction et d'en favoriser l'usage le plus étendu pour des fins industrielles et humanitaires, nous sommes d'avis qu'une commission relevant de l'Organisation des Nations Unies et chargée de lui soumettre des recommandations devrait être créée dans le plus bref délai possible. »

Le 27 décembre 1945, à l'occasion d'une conférence à Moscou, les trois ministres des Affaires étrangères, James Byrnes, Ernest Bevin et Vyacheslav Molotov, se mirent d'accord pour inviter la France, la Chine et le Canada à patronner avec eux une résolution suggérant à l'Assemblée générale des Nations Unies, en janvier 1946, la création d'une Commission chargée de l'énergie atomique, dans l'esprit de la déclaration de la Maison-Blanche.

Finalement, le 24 janvier 1946, est votée à l'unanimité des quarante-sept nations des Nations Unies la création d'une commission qui serait chargée d'étudier les problèmes soulevés par la découverte de l'énergie atomique et d'autres problèmes connexes, et aussi des autres armes de destruction en masse (guerre bactériologique...).

La Commission sera composée d'un représentant de chacun des États représentés au Conseil de Sécurité et du Canada quand celui-ci n'est pas membre du Conseil.

La législation américaine.

Sur le plan intérieur américain, les techniciens entreprirent durant les derniers mois de l'année 1945 un énorme effort pour alerter le public et lui exposer le problème atomique et ses dangers. Une brochure écrite en commun par une quinzaine de grands noms de la science, de l'armée et du journalisme se vendit à près d'un million d'exemplaires, son titre : *One World or None* (Le Monde sera unifié ou ne sera pas) montre clairement son thème. Les descriptions d'Hiroshima y voisinent avec des visions terrifiantes d'une attaque atomique sur New York.

Sur le plan du Congrès, dès octobre 1945, la Chambre des représentants proposait un projet de loi qui créait une Commission responsable de l'effort atomique américain, cette Commission devait comprendre deux militaires dans son Comité suprême. Les savants s'opposèrent à ce projet, demandant que le contrôle soit retiré des mains de l'armée, car ils se refusaient, disaient-ils, à travailler

en temps de paix sous la rigueur des consignes militaires.

Le Sénat américain décida de créer alors une Commission d'enquête composée de sénateurs des deux partis et présidée par le sénateur Brien Mac Mahon. De fin novembre jusqu'en avril 1946, cette Commission se réunit plusieurs fois par semaine en séances publiques ou secrètes pour entendre la déposition de tous ceux qui avaient participé à la responsabilité de la réalisation américaine : les grands de la science, de l'armée, de l'industrie y déposèrent ainsi que des administrateurs et des juristes connus.

Les savants s'efforcèrent de montrer qu'il n'y avait pas de secret de la bombe atomique, malgré le silence qui semblait avoir été admirablement gardé pendant la guerre. L'espionnage allemand, qui avait eu connaissance de l'entreprise, n'en avait jamais compris le but exact; de là à conclure que ce fût *the best kept secret in the world*, il n'y avait qu'un pas : rien ne permettait de saisir encore l'importance des fuites qui avaient déjà eu lieu.

Toutefois, il est essentiel de se rendre compte qu'il n'y a pas de véritable secret atomique, ni pour la bombe ni pour la production d'énergie. Les données fondamentales sont connues de tous les savants du monde, et les principaux secrets techniques ont trait aux procédés de réalisation qui, bien que souvent délicats, sont toujours à la portée d'un grand pays décidé à fournir l'effort nécessaire.

Les savants américains, devant la Commission d'enquête du Sénat, affirmèrent que leur avance n'était que de trois à six ans sur l'U. R. S. S. Les événements devaient leur donner raison. Au contraire, l'armée, et en particulier le général Groves qui avait dirigé l'effort atomique de guerre, estimait le retard russe à quinze ou vingt ans. C'est ainsi qu'on arriva à considérer aux U. S. A. sept ans comme une avance minimum, et l'on peut dire que la politique américaine ne prévoyait pas la construction de la première bombe soviétique avant 1952.

Au cours de l'une des séances de la Commission, un sénateur ayant demandé à Oppenheimer s'il existait un instrument permettant de déceler une bombe atomique cachée dans une ville, le grand physicien répondit : « Oui, cet instrument existe, c'est un tournevis avec lequel il

faudrait ouvrir chaque coffre, chaque armoire, chaque piano de chaque maison de la ville. » En réalité, un compteur Geiger permettrait sans doute de déceler la radioactivité de la matière fissile sans ouvrir la caisse ou l'armoire, et un tel contrôle est aujourd'hui appliqué par le service des douanes à tout colis pénétrant aux États-Unis.

Malgré les efforts des partisans du contrôle de l'armée, le Président Truman entra en ligne et fit savoir qu'il était en faveur d'une Commission constituée uniquement de civils. Son poids fit pencher la balance et finalement la loi américaine, le Mac Mahon Bill (du nom du sénateur qui la proposa) qui régit l'énergie atomique en temps de paix, fut votée fin juillet 1946.

Cette loi confie tous les problèmes de l'énergie atomique à une Commission de cinq civils nommés par le Président avec l'accord du Sénat. Tout ce qui touche à l'énergie atomique, du minerai au combustible nucléaire, ainsi que les usines, tombe sous l'autorité de la Commission et devient sa propriété. Le secret est maintenu et la peine de mort, même en temps de paix, punit les coupables de divulgations à une puissance étrangère. Une division d'applications militaires est confiée à l'armée et les militaires responsables peuvent assister à toutes les réunions de la Commission.

Sur le plan des relations extérieures, la nouvelle loi impose l'isolationnisme atomique, car elle soumet à l'accord du Congrès, imbu de l'avance nationale, toute collaboration de la Commission atomique américaine avec d'autres pays. De ce fait, depuis 1946 jusqu'à la première modification de la loi en juillet 1954, la coopération avec les alliés de la guerre, l'Angleterre et le Canada, allait pratiquement cesser sauf dans quelques domaines restreints, où elle s'imposait comme une suite normale des relations passées. A plus forte raison, il n'y eut aucune collaboration avec d'autres nations comme la France ou les autres pays d'Europe occidentale.

Je devais moi-même subir les conséquences de cette politique : à la fin de l'année 1945, au moment du retour dans leur pays des techniciens français qui avaient travaillé à Montréal et Chalk River pendant la guerre Sir

John Cockcroft, d'accord avec Joliot, me demanda de rester pendant l'année 1946 à la tête de la division de chimie de l'entreprise anglo-canadienne pour achever la mise au point du procédé d'extraction du plutonium que nous avions élaboré indépendamment des U. S. A. Un mois plus tard, mon départ était imposé, du fait de mes liens officiels avec le Commissariat à l'Énergie Atomique français récemment créé.

Après mon retour en France, en février 1946, il ne restait plus dans l'équipe de Chalk River qu'un seul étranger, le physicien italien Bruno Pontecorvo qui, sans lien avec son gouvernement, et prêt à continuer à travailler pour le compte des Anglo-Saxons, apparaissait comme acceptable pour les Américains. On ne se doutait pas alors que d'autres liens bien plus dangereux allaient quelque quatre ans plus tard faire regretter de ne pas lui avoir aussi fait partager le sort qui m'avait été réservé.

Le plan Baruch.

Pendant que le gouvernement américain s'engageait ainsi dans la politique du « Club Atomique » à un membre, il offrait la solution du club à zéro membre, en faisant connaître les conditions dans lesquelles il accepterait de renoncer à son monopole atomique et de partager ses connaissances avec le reste du monde. Ces conditions sont contenues dans un rapport rédigé par cinq personnalités américaines, dont Robert Oppenheimer, sous la direction de David Lilienthal, président de l'administration du projet d'exploitation nationale de la vallée du Tennessee. Ce rapport fut présenté par l'homme d'État Bernard Baruch en juin 1946 à la première séance de la Commission de contrôle de l'énergie atomique des Nations Unies, née de l'accord anglo-américain-soviétique de décembre 1945.

Le plan Baruch est une solution presque aussi révolutionnaire sur le plan politique que l'utilisation de l'énergie atomique l'est sur le plan technique. Il repose sur le fait que pour l'arme atomique aucun système de sécurité ne pourra être fondé uniquement sur des pactes du genre Briand-Kellogg de mise hors la loi de la guerre ni même sur le contrôle et l'inspection.

Il propose que toutes les étapes dangereuses (du point

de vue de la fabrication des armes atomiques) soient soustraites à la compétence des États et confiées à une autorité internationale. Cette autorité serait propriétaire des mines et des matériaux nucléaires et aurait la gestion des usines de production de combustibles nucléaires, ainsi que des piles productrices d'énergie, tandis que des inspecteurs internationaux auraient pour mission de déceler les activités clandestines éventuelles.

Le rapport Lilienthal faisait en plus état de la possibilité de dénaturer les matières fissiles par la présence d'isotopes les rendant impropres aux usages militaires tout en permettant leur utilisation à des fins civiles. Il s'agissait d'uranium 235 dilué par plusieurs fois son poids d'uranium 238 et de plutonium à teneur élevée en plutonium 240. Cette notion de dénaturation fut abandonnée rapidement en raison des progrès réalisés dans le domaine militaire permettant sans doute l'utilisation du plutonium, même assez riche en isotope 240.

L'Autorité envisagée devait être un organisme supranational possédant en propre une grande industrie, l'exploitant et la développant au nom et dans l'intérêt de toutes les nations; en somme, un échantillon de gouvernement mondial dans une affaire de portée mondiale.

Un système d'étapes transitoires aurait permis de passer du stade des exploitations nationales à celui des exploitations internationales. Au cours de cette période, les États-Unis auraient cédé leurs connaissances secrètes, leurs bombes et leurs usines à l'autorité qui en aurait pris possession.

Au cours des négociations poursuivies en 1947, Oppenheimer avait été entendu par la Commission qui souhaitait connaître les délais dans lesquels l'énergie atomique serait utilisée industriellement. Oppenheimer avait prédit une première réalisation de production d'électricité avant cinq ans, puis dans un délai de dix à vingt ans la construction de quelques centrales dans des régions géographiques du globe à électricité chère, enfin un développement massif après trente à cinquante ans. Ces prédictions faites très tôt dans le développement technique semblent aujourd'hui beaucoup plus près de se confirmer que les pronostics optimistes établis quelque huit à dix ans plus tard.

Le plan Baruch, qui avait été conçu à une époque où régnait la conception erronée que l'uranium était peu répandu à la surface du globe, tendait à créer une sécurité absolue, utopique aujourd'hui, car les États-Unis recherchaient une assurance totale contre une fabrication clandestine, ne serait-ce que d'une seule bombe. Il aurait eu, bien entendu, pour conséquence l'ouverture de l'Union Soviétique au reste du monde.

Dès le début des négociations, les points de vue américain et russe se révélèrent inconciliables. L'U. R. S. S., en état d'infériorité, cherchait à obtenir la destruction du stock de bombes américaines en proposant la mise hors la loi inconditionnelle de l'arme atomique. Cinq jours après le dépôt du plan Baruch, le ministre des Affaires étrangères soviétiques, Andréi Gromyko, proposait une convention internationale perpétuelle ouverte à toutes les nations et comprenant : l'interdiction absolue d'utilisation des armes atomiques, la prohibition de la production et du stockage de celles-ci, et l'obligation de destruction des armes existantes ou en fabrication dans les trois mois suivant l'entrée en vigueur de la convention. Toute violation serait considérée comme un crime contre l'humanité et les États signataires devraient s'engager, dans un délai de six mois après la mise en œuvre de la convention, à établir une législation prévoyant des peines sévères pour ceux qui en violeraient les statuts.

Cette proposition allait devenir un des leitmotive de la propagande communiste pendant les années à venir. La suggestion illusoire initiale de contrôle par les pays eux-mêmes fut en 1947 remplacée par une offre de contrôle international périodique jugée insuffisante par les Américains.

Il est certain que le plan Baruch, adopté par la majorité des pays membres de la Commission de Contrôle de l'énergie atomique des Nations Unies, contenait des éléments de supranationalité (dont certains seront repris dans le Traité d'Euratom) si étendus qu'ils étaient difficiles à admettre pour des pays n'ayant pas une confiance absolue les uns dans les autres. L'Union Soviétique ne put les accepter et rejeta le plan américain considéré par elle comme une atteinte inacceptable pour sa sou-

veraineté nationale. Certaines clauses furent même l'objet de controverses entre pays occidentaux et une concession fut faite aux nations productrices d'uranium et de thorium qui obtinrent dans le projet de traité de garder la propriété de leurs minerais tant que ceux-ci n'auraient pas été extraits du sol.

Au printemps de 1948, après deux ans de travail et plus de deux cents séances, la Commission de Contrôle de l'énergie atomique des Nations Unies fit connaître qu'elle avait abouti à une impasse et cessa ses travaux. La première tentative de désarmement nucléaire international avait échoué.

Il est compréhensible qu'en l'absence d'une confiance mutuelle entre la Russie soviétique et les États-Unis, l'U. R. S. S. n'ait pas voulu accepter ce plan, car à son point de vue elle n'aurait pu le faire sans hypothéquer sa sécurité. En effet, le secret qui couvre la répartition de ses centres industriels est sa meilleure protection contre les destructions éventuelles de l'arme atomique. Elle pourrait redouter de devenir une cible infiniment plus facile à atteindre si, après s'être ouverte au monde, un conflit devait néanmoins surgir.

Ce point de vue expliquait la proposition soviétique qui demandait d'abord la suppression du monopole américain par la destruction des bombes.

Malgré ses aspects utopiques et peut-être à cause de ceux-ci, l'échec de l'offre du plan Baruch n'en reste pas moins une grande défaite dans la voie de la paix mondiale et de l'évolution de l'humanité : la dernière chance de vivre dans un monde sans la bombe nucléaire avait disparu : en effet, à cette date, il aurait été facile en cas d'ouverture au contrôle international des usines américaines, de connaître le nombre exact des quelques dizaines de bombes fabriquées depuis 1945. Aujourd'hui, il n'en est plus rien, c'est par milliers de bombes que se chiffrent les stocks d'armes des deux plus grandes puissances atomiques. La confiance totale ne pourra sans doute plus jamais régner car au moment de la mise au point éventuelle d'un désarmement nucléaire international, il n'y aura aucun moyen de contrôler l'exactitude d'une déclaration de stocks d'armes atomiques par un pays en possé-

dant un grand nombre, dont il pourra toujours garder en réserve une fraction clandestine et indécelable.

L'effort américain de l'après-guerre.

Si les années qui suivirent la guerre allaient représenter pour l'Union Soviétique une période de travail considérable destiné à rattraper un retard réel, par contre les mêmes années allaient être marquées par une certaine détérioration du développement atomique américain, correspondant à la démobilisation industrielle du pays et à la poursuite pendant la paix de la politique du secret. Les crédits annuels réduits aux U. S. A. à un tiers de milliard de dollars pour 1946 et 1947 devaient doubler en 1948 et 1949. Ce n'est qu'en fin 1949 que l'effort atomique retrouva le niveau en hommes et en dépenses qu'il avait à la fin de la guerre.

A la fin de l'été 1946, David Lilienthal avait été nommé directeur de la Commission atomique américaine. Bien qu'il fût déjà connu par ses talents d'administrateur et par le plan de contrôle international auquel il avait donné son nom, sa nomination, fortement combattue par les adversaires de toute forme de nationalisation de la production d'électricité, ne fut confirmée par le Sénat qu'au début de 1947 après de nombreuses séances d'une commission d'enquête réunie à cet effet.

La réorganisation civile de l'administration atomique américaine s'effectua durant l'année 1947 non sans difficultés. Certains groupes industriels s'étaient retirés de l'entreprise tandis que de nombreux savants retournaient à leurs carrières universitaires; ils avaient du mal à s'habituer en temps de paix à l'ironie de leur conduite qui consistait à entreprendre des efforts extraordinaires pour arracher à la nature la solution d'une de ses énigmes les plus difficiles, celle de la structure de la matière, pour voir ensuite enfermer leurs résultats dans des coffres. Ils ne niaient pas la nécessité du secret dans certaines limites, mais maintenaient que celui-ci est une arme à double tranchant : il ralentit les échanges scientifiques et par suite le progrès, non seulement en matière scientifique mais aussi dans le domaine militaire.

L'existence d'une limitation du secret avait d'ailleurs

été dans une certaine mesure admise dès 1946 par les trois gouvernements anglo-saxons lorsqu'ils créèrent un comité tripartite ayant pour mission de décider peu à peu celles des données techniques qui pouvaient être « déclassifiées » c'est-à-dire libérées du « secret ».

Malgré le ralentissement de l'effort, les grands centres de recherche d'Oak-Ridge, d'Argonne près de Chicago et de Los Alamos continuent à fonctionner sous la nouvelle administration civile de la Commission atomique, et sont dotés de plusieurs réacteurs de recherche; il est même décidé de créer de nouveaux grands établissements, l'un à Brookhaven près de New York, destiné essentiellement à la recherche fondamentale, dont la gestion sera confiée à une association de neuf grandes universités de la côte Ouest, l'autre à Arco dans l'État d'Idaho où sera érigée une station nationale d'essais de réacteurs.

Néanmoins, l'entreprise à cette époque est encore principalement dirigée vers les applications militaires, il s'agit de préparer des bombes plus efficaces et moins encombrantes que les premières, et d'en avoir le plus grand nombre possible. Les premières difficultés inter-armes apparaissent alors dans ce domaine; le Département de la Marine envie celui de l'aviation qui a le monopole du transport de la bombe, et il organise à grand renfort de publicité durant l'été 1946, en même temps que se tiennent les premières réunions de la Commission de Contrôle de l'énergie atomique des Nations Unies, les grandes manœuvres navales atomiques de Bikini. Celles-ci vont mettre en jeu un personnel de quarante-deux mille hommes et la presse mondiale s'en empare d'une façon exagérée et malsaine. J'ai assisté à cette extraordinaire démonstration à titre de représentant d'un des dix pays membres du Conseil de Sécurité des Nations Unies (dont l'U. R. S. S. et la Pologne) qui avaient été invités à envoyer chacun deux observateurs.

Deux bombes, équivalant chacune en puissance à vingt mille tonnes d'explosif classique, c'est-à-dire analogues à celles utilisées au Japon, allaient exploser l'une en altitude, l'autre à quelque dix mètres de profondeur dans la mer, en vue de l'étude de leurs effets sur une flotte assemblée. L'expérience sous-marine, déclenchée par radio à

trente kilomètres de distance, provoqua une immense colonne de quelques millions de tonnes d'eau qui souleva comme un fétu de paille et brisa un vieux cuirassé voué à la ferraille et qui était situé à quatre cents mètres du point zéro. Haute de deux kilomètres et demi avec sept cents mètres de diamètre, cette colonne entraîna la formation à sa base d'une vague de plus de cent mètres de haut. L'ensemble, éclairé par le soleil constituait un spectacle surnaturel et inoubliable qui dura une fraction de minute.

A mon retour à Paris, je décrivis les horreurs des effets de l'arme atomique au cours d'une conférence qui, bien que présidée par Joliot-Curie, me fit traiter de croquemitaine par la presse communiste, cherchant alors à minimiser l'avance militaire américaine.

Le Département de la Marine devait par la suite, en 1948, obtenir gain de cause sur celui de l'Aviation, en se faisant accorder la mise en chantier de porte-avions de soixante mille tonnes, pouvant transporter des avions porteurs de la bombe, ceci malgré la vulnérabilité à l'arme atomique de ces cibles flottantes démontrée par la Marine elle-même à Bikini, et confirmée en 1948 dans le Pacifique par trois nouveaux essais d'engins plus puissants et plus efficaces. Enfin en 1949, les efforts du commandant de marine Hyman Rickover, menés depuis deux ans en faveur d'un sous-marin nucléaire, aboutissaient à l'importante décision de la création au sein de la Commission atomique d'une division navale dont l'objet allait être, en collaboration avec la marine, l'étude et la construction d'un moteur pour sous-marin.

Reprise des travaux britanniques.

L'Europe continentale de l'Ouest, qui avait été avant la guerre le berceau de la recherche atomique, allait se trouver après les hostilités très handicapée pour la reprise de ses travaux.

De nombreux pays avaient subi l'occupation, l'Allemagne la ressent à son tour et les puissances occupantes lui interdisent toute recherche nucléaire, certaines des équipes ont été dispersées comme la pléiade de brillants physiciens réunis à Rome par Fermi vers 1934 et presque tous passés aux États-Unis, l'uranium est aux mains

des puissances anglo-saxonnes et la Belgique elle-même ne peut disposer pour ses propres laboratoires de la moindre fraction de la production du Congo. La France, ayant participé dans une certaine mesure à l'effort de guerre, possède quelques-unes des données techniques nécessaires. Par contre, le Royaume-Uni jouit à la fois des connaissances, de l'accès à la matière première et, ce qui est encore plus important, d'une grande équipe de techniciens formés dans les laboratoires et les usines américains et canadiens. Il ne pourra cependant pas en faire profiter les pays européens ni contribuer à leur démarrage atomique, en raison de son adhésion à la politique du secret acceptée en 1945.

Par une loi de novembre 1946, toute la responsabilité du développement de l'énergie atomique dans le Royaume-Uni est confiée au gouvernement, qui en avait déjà le monopole. Cette loi donne les pleins pouvoirs dans ce domaine au ministre des Armements et de la Reconstruction (Minister of Supply). Les divulgations de secrets atomiques en temps de paix sont passibles de peines de cinq ans de prison au maximum, beaucoup moins sévères qu'aux États-Unis.

Les budgets annuels vont situer en gros l'effort anglais à un niveau à peu près dix fois inférieur à celui de l'entreprise américaine. Néanmoins, malgré plusieurs années de retard sur les États-Unis, (dont ils sont à nouveau isolés à la suite de l'adoption de la loi Mac Mahon en 1946), les Anglais se lancent dans la réalisation de la même série d'ouvrages que leurs devanciers; sous la direction de Sir John Cockcroft est installé un grand établissement de recherche à Harwell, non loin d'Oxford, sur un grand terrain d'aviation désaffecté dont les hangars vont servir à abriter les deux premières piles de recherche qui utilisent le graphite et l'uranium naturel, la première d'entre elles de faible puissance, entrera en fonctionnement pendant l'été 1947, cinq ans après celle de Fermi aux U. S. A.

L'étape suivante sera la construction, à Windscale au nord de l'Angleterre, dans le Cumberland, de deux grands réacteurs plutonigènes analogues à ceux de Hanford, mais refroidis par air au lieu de l'être par une circulation d'eau;

une usine de traitement de l'uranium irradié pour l'extraction du plutonium leur est adjointe.

La production de l'uranium 235 est abordée parallèlement par la construction à Capenhurst, dans la région de Manchester, d'une usine de séparation isotopique par diffusion gazeuse de l'hexafluorure d'uranium, c'est-à-dire du même type que l'une des deux usines américaines; le procédé utilisé est basé sur les travaux britanniques en ce domaine, poursuivis pendant la guerre indépendamment des recherches américaines.

Ainsi le gouvernement travailliste, sans le reconnaître officiellement, donne la priorité à la fabrication de l'arme atomique en entreprenant la production du plutonium et celle de l'uranium 235, qui vont permettre au Royaume-Uni de devenir une puissance atomique indépendante sur le plan militaire comme sur le plan civil. Toutefois, le gouvernement Attlee renonce, en 1948, à la demande de Washington, au droit de veto sur l'utilisation des armes atomiques américaines qui lui avait été donné par les accords de Québec. Cet abandon sera rendu public quelques années plus tard, et attaqué par Churchill, l'artisan de la collaboration atomique passée.

Durant cette période, l'effort britannique reste étroitement lié aux travaux canadiens auxquels participent encore de nombreux techniciens anglais qui peuvent ainsi se former à Chalk River. Le programme canadien de piles atomiques repose sur l'utilisation de l'uranium naturel mais utilise l'eau lourde comme modérateur. Cette orientation est inspirée des travaux anglo-canadiens de la guerre et va se matérialiser par la mise en marche en 1947 d'un grand réacteur de quarante mille kilowatts thermiques qui sera pendant plusieurs années le plus avancé du monde.

Enfin, le Royaume-Uni va adopter dès 1948 une politique plus souple que son allié américain dans le seul domaine non secret à cette date : celui de l'application des radioéléments artificiels. En effet, tandis que la Commission atomique des U. S. A. décide en 1947 d'autoriser l'exportation des radio-isotopes sous réserve de conditions d'emploi pacifique, de publication des résultats et d'un mécanisme complexe de demandes et d'autorisations, le centre de Harwell se satisfait d'une garantie

d'utilisation sérieuse émanant d'une autorité officielle du pays du demandeur, et met tout en jeu pour que les délais entre commandes et fournitures soient les plus réduits possibles.

Ainsi, dans ce champ d'activité, le Royaume-Uni va marquer un avantage sur son concurrent et conquérir sur le marché mondial une position commerciale prédominante, encore sensible aujourd'hui, de nombreuses années après la disparition des restrictions américaines.

Les savants américains avaient d'ailleurs insisté auprès de leur gouvernement pour que disparaisse tout reflet de la politique d'isolationnisme en ce domaine des radioéléments artificiels, totalement étranger à l'armement atomique. C'est à cette occasion qu'Oppenheimer, conseiller scientifique de la Commission atomique américaine, devait s'opposer pour la première fois à l'un des membres de la Commission, Lewis Strauss, hostile à l'envoi à un Institut de défense norvégien d'une quantité minime d'isotope radioactif du fer.

Les débuts du Commissariat à l'Énergie Atomique français.

L'histoire de l'effort atomique français est celle d'une longue série de décisions gouvernementales et de choix techniques qui, découlant logiquement les uns des autres, ont amené notre pays à reprendre sa place dans le développement industriel des utilisations de la fission de l'uranium à la découverte de laquelle ses savants avaient tant contribué.

Dès le 18 octobre 1945, le gouvernement provisoire présidé par le général de Gaulle décide par une ordonnance de confier à un organisme public toutes les responsabilités en matière atomique, ceci au moment même où viennent d'être transférées à l'État la production et la distribution de l'électricité et du gaz. L'expérience de ces quinze dernières années montre que le choix était heureux, aucun pays industrialisé n'ayant pu réussir à se lancer efficacement dans l'utilisation de l'énergie atomique sans qu'un organisme centralisé d'État prenne la direction et le financement de cette nouvelle branche de la technologie, forcément déficitaire à ses débuts.

La mission du Commissariat à l'Énergie Atomique (C. E. A.) était de relancer l'effort paralysé par la guerre et de préparer le pays à l'utilisation de la forme nouvelle d'énergie dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale. Placé sous l'autorité et le contrôle du président du Conseil, il allait bénéficier d'un statut original, unique en France, car, bien qu'établissement public, il devait avoir une gestion régie par le droit privé et jouir de l'autonomie administrative et financière, sa vocation étant à la fois scientifique, technique et industrielle.

L'exposé des motifs de l'ordonnance, préparée par le Conseiller d'Etat Jean Toutée, précisait que les statuts de l'organisme nouveau étaient inspirés de ceux de la régie des Usines Renault et affirmait que cet organisme « devait être à la fois très près du gouvernement, et pour ainsi dire mêlé à lui, et cependant doté d'une grande liberté d'action » et devait correspondre « à une création assurément originale et qui, justifiée par le caractère exceptionnel de la matière à laquelle elle s'applique, ne pourra être invoquée comme précédent ».

En ce qui concerne la direction du nouvel organisme, le gouvernement renonçait à choisir entre un administrateur et une personnalité scientifique, et confiait à un administrateur général délégué du gouvernement la responsabilité administrative et financière, et à un haut commissaire la direction scientifique et technique. Dès 1945 il faisait appel aux deux responsables de l'effort de 1940, Raoul Dautry et Frédéric Joliot-Curie, assistés d'un Comité de l'Énergie Atomique, composé de personnalités du monde de la science et de la technique et de hauts fonctionnaires. Dautry avait au mois de mars 1945 attiré l'attention du général de Gaulle sur l'intérêt des travaux français de 1940, sur l'importance de leur reprise rapide et sur le rôle que la Norvège pourrait jouer pour la fourniture d'eau lourde.

Mais ce n'est que deux mois plus tard que Pierre Auger, au courant des succès de l'entreprise américaine, et Joliot-Curie convainquirent le président du gouvernement provisoire de la nécessité de créer en France un organisme consacré à l'énergie atomique.

Le prestige, le charme et le dynamisme de Joliot-Curie et la grande expérience des problèmes humains de Dautry promettaient de se compléter harmonieusement. Dès janvier 1946, ils réunissaient autour d'eux quelques collaborateurs dans le premier siège du nouvel organisme, deux appartements avenue Foch situés sur le même palier, consacrés, comme par une manifestation du bicéphalisme, l'un aux techniciens, l'autre aux administrateurs.

L'effort français à son début devait essentiellement être orienté vers la recherche scientifique et les utilisations pacifiques de l'énergie atomique. Le représentant français aux Nations Unies, Alexandre Parodi, le déclara officiellement en juin 1946 lors des premières réunions de la Commission de Contrôle de l'énergie atomique de l'O. N. U. dans les termes suivants : « Je suis autorisé à dire que les buts que le gouvernement français a assignés aux recherches de ses savants et de ses techniciens sont purement pacifiques. Notre vœu est que toutes les nations du monde fassent de même le plus tôt possible et c'est avec empressement qu'à cette fin la France se soumettra aux règles qui seront jugées les meilleures, pour assurer dans le monde entier le contrôle de l'énergie atomique. »

Coupé des sources d'uranium utilisées par les puissances occidentales, le C. E. A. disposait heureusement en 1946 d'une dizaine de tonnes d'uranium provenant d'une part du stock du Collège de France caché au Maroc pendant la guerre et d'autre part d'un wagon égaré d'uranate de soude, sans doute de provenance belge, trouvé par hasard après la fin du conflit en gare du Havre; il était là depuis plusieurs années et les employés croyaient, jusqu'au jour où ils en firent analyser un échantillon, que l'uranate contenu de couleur jaune vif était un colorant sans grande valeur. Ce stock devait s'avérer suffisant pour la mise en route des deux premières piles atomiques françaises. Il allait falloir plus de trois ans pour produire le même tonnage d'uranium à partir de ressources métropolitaines encore ignorées en 1946.

La quantité d'uranium disponible étant trop faible pour construire une pile au graphite, le choix d'une pile à eau lourde s'est ainsi imposé. La chance fut avec nous pour constituer un stock d'eau lourde, car, si la société

exploitant l'uranium du Congo belge, totalement liée à la Combined Development Agency, ne pouvait nous céder de l'uranium comme elle avait envisagé de le faire en 1940, par contre, l'industrie norvégienne était prête à reprendre le contrat de fourniture d'eau lourde signé en 1940. Elle nous livra en priorité les premières tonnes d'eau lourde qu'elle put produire et qui alimentèrent les trois premières piles expérimentales françaises.

Ainsi les décisions de 1940 portèrent leurs fruits six ans plus tard par l'obtention des deux matériaux indispensables, et par la connaissance des piles à eau lourde acquise par les quatre techniciens français de l'équipe du Canada qui allaient participer au renouveau de l'effort français.

Notre retour en France s'était d'ailleurs fait sans que nous fussions officiellement déliés de l'engagement du secret pris pendant la guerre par tous les travailleurs des équipes alliées. Cette disposition était incompatible avec notre future participation aux travaux français et m'amena, après mon départ prématuré du Canada, à me rendre à Washington au début de l'année 1946 pour discuter de ce problème délicat avec le général Groves, chef du Manhattan District; il fut alors convenu tacitement que nous pourrions faire profiter la France de toutes nos connaissances et les communiquer sans les publier à nos équipes au cours du déroulement des travaux à venir : cette solution représentait un compromis raisonnable et nous l'avons appliquée pendant les premières années du C. E. A. avec l'assentiment de ses dirigeants et sans qu'aucune des parties s'en soit plainte.

Les ressources disponibles, bienvenues mais limitées, orientèrent le programme : réaliser une réaction en chaîne, c'est-à-dire construire le plus rapidement possible une pile expérimentale. Le refroidissement d'une pile est techniquement très complexe : la pile envisagée sera de puissance presque nulle, limitée aux quelques kilowatts de chaleur pouvant se dissiper naturellement par les parois sans système d'extraction de chaleur. La production d'uranium métal est difficile à réaliser, on utilisera l'oxyde d'uranium qui douze ans plus tard sera considéré comme l'un des combustibles nucléaires de choix. Il faut rapidement des laboratoires pour permettre aux techniciens

recrutés en nombre croissant de se mettre au travail : on choisit le local le plus proche de Paris immédiatement disponible, le fort de Châtillon, construit après la guerre de 1870, et sur les glacis duquel venaient d'être exécutés les principaux « collaborateurs » des années de l'occupation. Des laboratoires de physique et de chimie sont installés dans de sombres casemates tandis que les machines-outils nécessaires sont ramenées à grand-peine de la zone d'occupation en Allemagne. L'industrie se voit confier les premières tâches de préparation des matières premières : d'une part le graphite très pur convenant aux utilisations nucléaires, d'autre part l'oxyde et l'uranium métal de haute pureté dont la fabrication est installée au Bouchet (Seine-et-Oise) dans les locaux d'une poudrerie nationale en partie inoccupée; cette dernière usine sera par la suite gérée par le C. E. A.

Chaque été, Joliot-Curie réunit ses proches collaborateurs pendant quelques jours pour élaborer le programme du C. E. A. pour l'année à venir. Ces réunions, détendues, ont lieu en Bretagne, à L'Arcouëst, dans le beau site où la génération précédente d'universitaires avait fondé dès 1895 une véritable colonie de vacances de savants, le «Fort-la-Science» des Seignobos, Lapicque, Perrin et Curie.

L'année 1948 voit la consécration d'une activité essentielle du jeune effort français par la découverte à La Crouzille, dans le Limousin, des premiers minerais français riches en uranium. L'année précédente des élèves prospecteurs, souvent d'anciens résistants, après quelques mois d'enseignement poussé, avaient couronné leurs études par une recherche sur le terrain de la radioactivité d'une région située à une vingtaine de kilomètres au nord de Limoges. Ils avaient trouvé quelques indices intéressants et, l'année suivante, leurs travaux furent repris par des prospecteurs de métier et poussés au stade suivant de la découverte d'un gisement important.

Enfin, la première pile atomique de l'Europe continentale de l'Ouest fonctionne le 15 décembre de la même année, à Châtillon : c'est ZOÉ (puissance Zéro, Oxyde d'uranium et Eau lourde [1]).

1. Dans ZOÉ, une soixantaine de barres verticales, constituées de pastilles d'oxyde d'uranium (trois tonnes environ)

Une telle pile allait constituer un excellent instrument de recherche sur le processus de la réaction en chaîne et la physique des neutrons. Elle devait également servir pour la préparation de radio-isotopes.

A cette date, l'effectif total du C. E. A. dépasse un millier d'agents, et son budget annuel atteint deux milliards d'anciens francs. Ce crédit ne représente encore à cette date que le dixième du budget atomique annuel du Royaume-Uni et le centième de celui des États-Unis.

L'année 1949 voit la mise en route sur le plateau de Saclay, sur un site choisi en 1946, du chantier du premier grand centre de recherche atomique national. On décide d'y construire une deuxième pile à eau lourde plus puissante que ZOÉ.

A la fin de cette année 1949, l'équipe française des chimistes du C. E. A. est amenée à extraire des barres de la pile ZOÉ les premiers milligrammes de plutonium.

La tâche des techniciens nucléaires français dépasse d'ailleurs le domaine scientifique, car il faut familiariser les dirigeants de la nation comme le grand public avec la révolution nucléaire. Pour la première fois, les savants font partie des délégations de diplomates, dont ils deviennent les conseillers scientifiques. Ainsi la longue route qui séparait New York de Lake Success, premier siège des Nations Unies, nous donnait souvent l'occasion d'expliquer les mystères du noyau et de sa fission à ceux qui allaient ensuite s'attaquer aux premières négociations de désarmement atomique international. Pour les techniciens, ce contact avec la politique internationale leur révélait à leur tour un monde non moins compliqué que celui de l'atome.

En 1949, Paul Ramadier, alors ministre de la Défense,

empilées dans des gaines d'aluminium, plongent dans cinq tonnes d'eau lourde contenues dans une cuve d'aluminium d'environ deux mètres de hauteur et de largeur. Un blindage constitué par un revêtement de béton de deux mètres d'épaisseur protège l'opérateur contre les radiations. Le réglage de la pile se fait par la variation du niveau de l'eau lourde ou le déplacement de barres de contrôle en cadmium, substance absorbant les neutrons.

Après quelques années de fonctionnement, l'adjonction d'un système de circulation et de refroidissement de l'eau lourde permettra de pousser la puissance dégagée à deux cents kilowatts thermiques.

me fit appeler pour lui apprendre, me dit-il, ce qu'était un atome, et plusieurs soirs de suite, en fin de journée, je lui expliquai les débuts de l'aventure atomique, assis à ses côtés à son grand bureau. Sa barbe blanche lui donnait bien plus l'air du bon professeur que de l'élève studieux dont il avait certainement gardé la curiosité et l'extraordinaire puissance de travail. Après la dernière leçon, il m'emmena faire le tour des salons de l'hôtel de la rue Saint-Dominique pour admirer les tapisseries représentant les victoires du Grand Siècle : celles-ci avaient encore plus l'air d'appartenir à un autre monde par contraste avec celui dont nous venions de discuter l'avenir.

Pour le grand public, il était important de donner une valeur exacte des choses, et en particulier d'expliquer que l'uranium n'allait pas ouvrir l'ère de l'énergie gratuite.

Le mystère de l'uranium faisait d'ailleurs à cette époque des victimes inattendues. Quelques centaines de kilos d'uranium métal avaient disparu à la fin de la guerre des laboratoires allemands. Si un professeur de la Faculté des Sciences de Paris avait trouvé, pour quelques centaines de francs, un lingot de plusieurs kilogrammes de métal dont le coût était alors de près de trente mille francs le kilo[2], par contre, des escrocs cherchaient à en vendre, à des prix plusieurs centaines de fois supérieurs à sa valeur, à des spéculateurs crédules désireux de mettre leur fortune sous un petit volume dans un coffre-fort.

Ainsi la police devait nous amener un jour, au laboratoire de Châtillon, une bonbonne de plomb qui avait été cédée avec son contenu supposé d'uranium pour quelques dizaines de millions de francs; son propriétaire avait été convaincu qu'il faisait œuvre de patriote en soustrayant le précieux produit à de prétendus espions. La bonbonne fut ouverte devant des compteurs de radioactivité qui restèrent, en présence des quelques kilos de sable contenus, aussi muets que la malheureuse victime de l'escroquerie.

Mais plus que tout, la réalisation rapide de la première pile mit en vedette le C. E. A. et son équipe de jeunes

2. L'uranium métal de grande pureté vaut aujourd'hui moins de la moitié, environ cent trente nouveaux francs le kilo.

techniciens. Cependant, tout en consolidant le nouvel organisme aux yeux du public, ce succès ne devait pas lui permettre de prendre un nouvel essor : le rôle politique de son haut commissaire attirait au C. E. A. des attaques croissantes, au fur et à mesure que la guerre froide s'amplifiait après le blocus de Berlin de 1948. De son côté, Joliot-Curie attaquait ouvertement la politique gouvernementale, lié par son appartenance au parti communiste qui paraissait le pousser vers une révocation qui aurait fait de lui une victime de ses idées politiques. La révocation fut effectivement décidée le 28 avril 1950 [3].

Il faut regretter cette emprise croissante de la politique sur le plus grand physicien nucléaire français. Elle devait ensuite l'éloigner de plus en plus de l'énergie atomique où il avait joué un rôle capital pour notre pays.

3. La décision fut annoncée officiellement dans les termes suivants : « Le président du Conseil a fait connaître au gouvernement qu'il devait, à regret, mettre fin aux fonctions de M. Joliot-Curie. M. Georges Bidault a précisé que, quels que soient les mérites scientifiques de ce savant, ses déclarations publiques et son acceptation sans réserve des résolutions votées par le Congrès de Gennevilliers du parti communiste rendent impossible son maintien dans ses fonctions de haut commisaire. »

4.

La course à la bombe H et les dernières années de la politique du secret.

1949-1954.

Quatre ans seulement après Hiroshima, le rapport des forces dans le monde changea brusquement à nouveau. Le monde l'apprit le 23 septembre 1949 par une annonce solennelle faite par le Président Truman d'une explosion atomique qui avait eu lieu fin août, mais il s'agissait cette fois d'une bombe soviétique et de la fin du monopole américain.

La détection, en septembre 1949, par des ballons-sondes américains et l'aviation militaire anglaise, d'un nuage radioactif dans la stratosphère, démontra la réussite inattendue des savants et de l'industrie soviétiques. L'effet de surprise provoqué par cet événement donna la preuve de l'efficacité du rideau du secret soviétique.

Deux erreurs de jugement avaient été commises par les dirigeants américains; ils avaient sous-estimé d'une part la puissance industrielle soviétique, ils avaient surestimé d'autre part l'efficacité du secret atomique qu'ils avaient voulu faire respecter.

La réussite soviétique.

Les techniciens soviétiques paraissent avoir suivi les mêmes voies que leurs prédécesseurs américains, toutes tracées dans le rapport Smyth. La première réaction en chaîne aurait été obtenue en U. R. S. S. au printemps 1947 dans une pile à uranium et graphite. Un des leaders de l'effort était le grand physicien Igor Kurchatov.

A la suite de ce succès, l'attitude soviétique se raidit

aux Nations Unies, et Molotov [1], ministre des Affaires étrangères, annonce en novembre 1947 que l'Union Soviétique possède aussi le secret de la bombe atomique.

A partir de 1947, les recherches atomiques semblent avoir pris une grande extension sous l'autorité de Lavrenti Beria, les deux voies, celle du plutonium et celle de l'uranium 235 obtenu par diffusion gazeuse, sont poursuivies. La première aboutit à l'explosion de la première bombe soviétique du mois d'août 1949 qui est à base de plutonium. Dès la fin de l'année 1949, les Russes mettent à l'étude la construction de la première centrale et de plusieurs réacteurs à uranium enrichi, preuve du fonctionnement, sans doute vers 1952, de l'usine soviétique de séparation isotopique de l'uranium 235. La production d'eau lourde avait été aussi mise au point parallèlement.

La reconnaissance officielle par l'U. R. S. S. de sa réussite devait prendre un aspect inattendu par l'annonce faite aux Nations Unies par Andréi Vichinsky, en novembre 1949, de l'utilisation de l'énergie atomique en Union Soviétique, pour déplacer des montagnes, irriguer des déserts et détourner des fleuves. Neuf ans plus tard, l'Union Soviétique dénoncera les projets américains d'utilisation pacifique des explosions nucléaires comme des tentatives militaires déguisées.

La participation scientifique allemande aux travaux nucléaires soviétiques ne paraît pas avoir été un facteur déterminant de leurs succès, bien que dès 1946 deux cent cinquante techniciens allemands (dont von Ardenne et le physicien de valeur Gustav Hertz) y furent employés après leur capture à la fin de la guerre. Ils avaient été réunis à Soukhoumi, sur la mer Noire, et un grand laboratoire fut installé pour eux dans un ancien sanatorium; ils furent surtout utilisés à des travaux en marge de l'effort proprement dit (électronique, appareils de mesure et d'analyse...) rendant ainsi disponibles des physiciens soviétiques pour des tâches plus importantes et secrètes. Au bout de dix ans, ils furent autorisés à rentrer en Alle-

1. Treize ans plus tard, cet homme d'État, entre deux étapes de sa disgrâce croissante, occupera pendant un an à Vienne le poste de délégué soviétique en second auprès de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

magne de l'Est, seuls restèrent en U. R. S. S. les trois physiciens allemands qui avaient épousé des femmes soviétiques.

Il est ainsi évident que la réussite soviétique n'a pu être obtenue que par un effort considérable réalisé par un pays en phase de reconstruction et lié à l'attribution de la plus haute priorité à la fois sur le plan scientifique et sur le plan industriel. Toutefois, une aide non négligeable fut apportée par des renseignements obtenus par espionnage.

Les affaires d'espionnage.

Après avoir acquis la certitude de l'explosion d'une bombe atomique russe, les États-Unis semblaient avoir envisagé de reprendre sérieusement avec le Royaume-Uni la collaboration atomique en sommeil depuis 1946. Les négociations, à la veille d'aboutir, furent interrompues à la suite des affaires d'espionnage qui éclatèrent en 1950. Toute chance de faire accepter par le Congrès américain un nouvel échange de données atomiques avec les Anglais allait être supprimée pour de nombreuses années.

La première affaire d'espionnage remonte d'ailleurs à 1946; on découvrit alors que l'un des meilleurs physiciens anglais de l'équipe anglo-canadienne, Alan Nunn May, avait communiqué vers la fin de la guerre d'importants renseignements à l'attaché militaire soviétique à Ottawa et lui avait fourni l'échantillon d'uranium 233 dont la disparition avait tant ému les chimistes de Montréal. La portée de cette fuite devait être réduite par la publication du rapport Smyth. May, arrêté, avoua et fut condamné à dix ans de prison pour avoir enfreint *l'official secrecy act*, même en faveur d'une puissance alliée à cette date.

La faiblesse de la protection du secret fut rendue plus évidente quand, en février 1950, un des principaux savants du groupe britannique, le physicien théoricien d'origine allemande, Klaus Fuchs, condamné depuis à quatorze ans de prison, avoua avoir communiqué à l'Union Soviétique, depuis 1942, toutes les connaissances qu'il avait acquises. Il s'agissait à la fois de renseignements importants sur la séparation isotopique de l'uranium et de données capitales recueillies aux États-Unis de 1943 à 1945 à Los Alamos, où Fuchs avait contribué à la réalisation de la première

bombe, dont il était un des très rares scientifiques à connaître le mécanisme exact.

May et Fuchs étaient tous deux communistes : May l'était devenu secrètement à seize ans à la suite de la ruine de son père, un fabricant anglais de boutons de portes; Fuchs, fils d'un pasteur allemand, avait quitté l'Allemagne en 1932 à vingt et un ans, après que sa sœur se fut jetée sous un métro au moment où la Gestapo venait l'arrêter. Ils ont été libérés après avoir purgé les deux tiers de leur peine. L'année 1962 trouve May sur le point de partir au Ghana comme professeur d'Université de physique nucléaire, et Fuchs occupant depuis deux ans le poste de directeur-adjoint de l'Institut de Physique nucléaire d'Allemagne orientale.

Durant l'été 1950, le physicien italien Pontecorvo que, contrairement à la décision prise à mon égard, les Américains avaient autorisé à rester à Chalk River en 1946, désertait avec sa femme et ses enfants l'Angleterre, sa récente patrie d'adoption, pour se rendre en Russie.

Il dirigeait alors une section à Harwell. Au début de l'année 1950, après l'explosion soviétique, les autorités britanniques lui avaient fait savoir qu'il ne pourrait plus rester au-delà de l'automne au sein de l'organisation atomique anglaise en raison de l'appartenance au parti communiste de plusieurs membres de sa famille. Une chaire de physique à l'Université de Liverpool lui avait été attribuée. C'est alors qu'il partit brusquement pour l'U. R. S. S. où il ne participa pas à des recherches sur l'énergie atomique mais à des travaux de physique fondamentale. Il n'est plus jamais revenu en Occident, où aucun fait d'espionnage n'a pu être d'ailleurs relevé à ce jour contre lui.

Tous les trois étaient de jeunes et brillants hommes de science mais tandis que May et Fuchs étaient des hommes taciturnes, le premier modeste, le deuxième orgueilleux, Pontecorvo au contraire était gai et ouvert et extrêmement populaire; jeune élève favori de Fermi, il était venu en France en 1936 pour un stage temporaire et était resté dans l'équipe de Joliot à la suite des mesures antisémites prises en Italie en 1938; il était ensuite parti pour l'Amérique du Nord après l'armistice de 1940 et il fut l'un des prin-

cipaux réalisateurs de la première grande pile à eau lourde canadienne. Il avait dû, en débarquant aux U. S. A., dénué de toutes ressources, vendre à un ami italien, pour cinq cents dollars, la moitié de sa part du brevet pris en 1934 sur le ralentissement des neutrons par Fermi et sept de ses collaborateurs. Ce brevet a été acheté depuis pour quatre cent mille dollars par le gouvernement américain et la fraction qui en revient à Pontecorvo est aujourd'hui bloquée dans une banque américaine.

Pontecorvo avait bien caractérisé le problème atomique, son évolution et son avenir inquiétant, en me disant dès 1943 au Canada que toute l'affaire ne cessera jamais d'être à la fois passionnante et déplaisante.

Enfin un dernier travailleur de Los Alamos, un mécanicien américain, David Greenglass, avait indépendamment fourni à un espion soviétique en 1944 des détails sur le dispositif de rassemblement de la masse critique de la bombe. Il était le beau-frère d'Ethel Rosenberg qu'il rendit ainsi que son mari Julius responsables de son acte. Son témoignage fut le principal chef d'accusation contre ce couple dont la condamnation à mort en 1951 et l'exécution en 1953 pour espionnage en faveur de l'Union Soviétique soulevèrent une grande émotion dans le monde entier et furent largement exploitées par la propagande antiaméricaine.

La course à la bombe à hydrogène.

La réaction américaine, devant la situation nouvelle, fut d'essayer non seulement de conserver une avance quantitative, mais aussi de retrouver une avance qualitative en faisant un nouveau pas en avant dans le domaine des armements atomiques. Le but à atteindre était de réaliser ce que les savants, dès 1943 déjà, avaient envisagé à Los Alamos sous le nom de surperbombe ou bombe à hydrogène.

L'hypothèse à vérifier est la suivante : la température de plusieurs dizaines de millions de degrés, créée par l'explosion d'une bombe atomique classique, peut-elle servir d'amorce au démarrage de la réaction de condensation ou de fusion d'atomes très légers, en particulier les divers

isotopes de l'hydrogène, pour donner des atomes d'hélium? En effet, on sait maintenant que les immenses quantités d'énergie dégagées par le soleil et les étoiles proviennent de réactions nucléaires au cours desquelles des noyaux d'atomes légers se transmutent les uns en les autres à la faveur des températures extrêmement élevées qui règnent dans les couches profondes des étoiles. En particulier, dans le soleil, dont la température centrale serait de l'ordre de quelque vingt millions de degrés C°, l'hydrogène est transformé constamment en hélium par un cycle assez complexe faisant intervenir divers isotopes d'atomes légers.

Cette réaction, dite de fusion ou thermonucléaire, en raison du rôle qu'y joue la température, produit, à poids égal de matière mise en jeu, dix fois plus d'énergie que la fission de l'uranium. De plus, la fusion une fois amorcée, le dégagement de chaleur qui l'accompagne pourrait maintenir la température initiale qui se propagerait de proche en proche avec pour seule limite la masse d'atomes légers disposés autour de la bombe atomique servant d'amorce.

La décision officielle de s'engager dans l'effort nécessaire à la réalisation d'une bombe à hydrogène (ou bombe H) fut prise publiquement par le Président Truman le 31 janvier 1950, quatre mois après l'annonce de l'explosion soviétique basée sur la fission.

De violentes discussions entre les dirigeants de la Commission atomique américaine avaient précédé cette décision. En effet, le Comité consultatif scientifique de la Commission, présidé par Robert Oppenheimer, le principal réalisateur de la bombe atomique à uranium, s'était déclaré, à l'unanimité de ses membres, contre cette nouvelle étape dans la course aux armements nucléaires. Les arguments présentés étaient multiples et pas seulement techniques : incertitude technique sur la possibilité de réalisation, crainte qu'en cas de réalisation éventuelle le volume de la nouvelle bombe ne soit trop grand pour permettre son transport par avion, et enfin doute sur l'opportunité morale pour les États-Unis de se lancer dans une nouvelle étape dans la science de la destruction. De plus, le principal constituant envisagé pour la mise en œuvre

de la nouvelle arme, le tritium [2], isotope rare d'hydrogène, ne peut être produit que dans une pile atomique, à un prix extraordinairement élevé et au détriment de la production du plutonium, c'est-à-dire des bombes atomiques classiques.

Tandis qu'à l'insu du reste du monde, l'Union Soviétique s'approchait elle aussi de la bombe à hydrogène et que s'engageait la guerre de Corée, les efforts américains en vue de la réalisation de la superbombe donnèrent rapidement des résultats. Dès 1951, certaines déterminations, faites au cours d'un essai atomique dans le Pacifique, furent concluantes, puis une découverte nouvelle du physicien Teller, un des grands protagonistes du développement de l'arme thermonucléaire, montra que celle-ci était sûrement réalisable. Oppenheimer se rallia alors lui-même à la décision prise. Au mois de novembre 1952, la première explosion thermonucléaire fut obtenue avec succès à Eniwetok, probablement à l'aide d'un dispositif trop volumineux pour être transporté à bord d'un avion.

Le mois précédent, le 3 octobre 1952, les responsables de la politique atomique américaine avaient subi une forte déception que Washington ne pouvait pas ne pas ressentir durement, bien qu'infligée par une nation alliée : l'entrée d'un troisième membre dans le Club atomique à la suite de l'explosion d'une bombe britannique au plutonium à Montebello sur la côte ouest de l'Australie, consécration des décisions prises dès 1946 par le gouvernement Attlee.

Enfin au mois d'août 1953, l'écoute « radioactive » américaine décelait une nouvelle explosion atomique soviétique et l'analyse du nuage montrait non seulement qu'il s'agissait d'une bombe thermonucléaire, mais que celle-ci avait mis en jeu certains matériaux différents de ceux utilisés dans l'explosion américaine qui l'avait précédée de neuf mois. Le tritium y aurait été remplacé, en partie au moins, par le lithium et le deutérium, qui, à l'opposé du premier, peuvent être trouvés dans la nature. L'Union Soviétique avait sans doute renoncé à l'utilisation du

2. Le tritium, isotope radioactif *bêta* de l'hydrogène, de masse 3 et de période douze ans, est produit par bombardement neutronique du lithium dans une pile.

tritium seul, trop coûteuse, et risqué de s'aventurer ainsi dans une voie plus simple mais dont les chances de succès apparaissaient plus faibles.

L'émotion fut considérable dans les sphères politiques américaines : une éclatante démonstration venait d'être donnée que l'espionnage n'était pas le principal facteur de la réussite soviétique et que les techniciens soviétiques avaient pu découvrir par eux-mêmes des techniques originales. Ce n'est que sept mois plus tard, le 1er mars 1954, que les États-Unis firent à leur tour exploser à Bikini une bombe thermonucléaire plus facile et moins coûteuse à réaliser, et analogue sans doute à celle de l'Union Soviétique. L'équilibre était rétabli entre les deux grands, mais une nouvelle discontinuité venait d'être franchie dans la science de la destruction. La bombe du 1er mars était près de mille fois plus puissante que celle d'Hiroshima. Sa puissance explosive, dix fois supérieure à celle correspondant au total de toutes les bombes classiques alliées lancées par avion pendant les quatre ans de la dernière guerre sur le territoire allemand, était équivalente à quatorze millions de tonnes d'explosif classique.

Les retombées radioactives de cette bombe expérimentale de Bikini provoquèrent de très graves troubles de santé chez des pêcheurs japonais qui se trouvaient sur un bateau à cent cinquante kilomètres de l'explosion. Ce fait, et la publicité qui l'entoura, ont contribué à donner peut-être pour la première fois au grand public une idée exacte de l'immense potentiel de destruction du nouvel explosif, ainsi qu'à créer une angoisse sans cesse croissante vis-à-vis des dangers des retombées radioactives dues aux explosions expérimentales.

Aux U. S. A., la surprise causée par l'explosion soviétique se traduisit par une mise en accusation d'Oppenheimer qui avait déconseillé, sinon freiné, les recherches américaines dans ce domaine. Lewis Strauss, chargé par la nouvelle administration républicaine depuis juillet 1953 de présider la Commission atomique américaine, partisan affirmé de la bombe H, et qui avait déjà été en conflit avec Oppenheimer plusieurs années auparavant, déclencha l'affaire.

Il fit d'abord savoir au conseiller scientifique de la

Commission atomique la décision de lui retirer son droit d'accès aux documents secrets. Oppenheimer réagit et demanda l'institution d'une Commission d'enquête; il obtint gain de cause et la question fit l'objet pendant plusieurs semaines au printemps de 1954 d'un long et pénible débat, dont les comptes rendus furent malheureusement rendus publics, bien que les témoins aient été chaque fois assurés du complet secret de leur déposition.

Rien n'y fut caché de la vie et des actions les plus intimes de cet homme qui fut après la guerre un des proches conseillers du secrétaire d'État démocrate Dean Acheson. Il était devenu une idole du public fasciné par son rôle dans la mise au point de la bombe atomique, par son intelligence remarquable, sa silhouette élancée et son regard pénétrant et triste. Oppenheimer se vit en particulier reprocher la fréquentation avant la guerre des organisations américaines d'extrême-gauche, ce qui était publiquement connu, et le fait d'avoir cherché en 1942 à couvrir, avant de donner son nom, un de ses collègues de l'Université de Californie qui avait envisagé de renseigner l'Union Soviétique sur les questions atomiques. Finalement, à la suite d'une décision majoritaire de la Commission d'enquête (deux voix contre une) confirmée par la Commission atomique (quatre voix contre une), il fut privé, malgré ses services passés, de toutes ses fonctions de conseiller du gouvernement.

Longtemps, les milieux scientifiques et universitaires américains furent troublés par cette décision qui représente une des premières réactions d'une civilisation qui ne sait plus si elle doit arrêter ou encourager dans leur travail les savants, véritables sorciers des temps modernes, et s'opposer à leur influence croissante dans le domaine politique. Ces derniers sont d'ailleurs de plus en plus conscients de leur pouvoir et de l'importance du rôle qu'ils peuvent jouer dans l'évolution de la civilisation; ils n'acceptent pas toujours de ce fait de limiter aux seuls aspects techniques les conseils qu'ils sont appelés à donner et en arrivent à hésiter à poursuivre les recherches aboutissant pour la première fois à des moyens qui permettront au monde de se détruire lui-même.

La relance de l'entreprise américaine et les besoins en uranium.

La première explosion soviétique de 1949 et la décision américaine de réaliser la bombe à hydrogène donnèrent un coup de fouet à l'entreprise américaine ralentie après la guerre, et il fut immédiatement décidé d'amplifier considérablement la production des explosifs nucléaires.

Cet effort allait entraîner bien entendu des besoins accrus en uranium, et, à un moment où les ressources du Congo belge commençaient à décroître, un grand programme de prospection internationale fut décidé, rapidement engagé et résolu avec succès par les pays anglo-saxons qui en moins de dix ans allaient mettre sur pied une industrie minière de l'uranium, d'importance mondiale, dont l'objectif initial était essentiellement militaire.

L'élément recherché est relativement abondant à la surface de la terre, autant que le cuivre. Mais la richesse des minerais disponibles est rarement supérieure à 10 %, comme c'était le cas pour ceux de Bohême, du Katanga et du nord du Canada, qui fournissaient le radium avant la guerre, et sont aujourd'hui en grande partie épuisés. L'uranium se trouve le plus souvent à de très faibles concentrations, en particulier à la teneur de quelques parties par million dans tous les granits du globe. Ceux-ci représentent une immense réserve potentielle, mais aucun procédé chimique n'est à l'heure actuelle, malgré les progrès réalisés, capable d'en isoler l'uranium à un prix acceptable.

Deux facteurs nouveaux allaient cependant grandement faciliter la réussite du programme. D'une part, la possibilité de détecter aisément l'existence des minerais uranifères : les rayonnements qu'ils émettent rendent possible une prospection par compteurs de radiations de sensibilité très élevée, portatifs ou installés à bord de jeeps ou même de petits avions ou hélicoptères, facilitant l'exploration superficielle rapide de toute une région. D'autre part, la mise au point de méthodes chimiques nouvelles [3]

3. Ces méthodes sélectives d'extraction et de purification basée sur l'absorption par résines échangeuses d'ion ou l'extraction par

permettant, à partir de minerais pauvres à 1 ‰, une extraction industrielle facile de l'uranium et son raffinage ultérieur en matériaux de haute pureté : hexafluorure pour l'alimentation des usines de séparation isotopique, métal ou oxyde pour les combustibles des piles plutonigènes.

Dès 1950, les gouvernements américain et britannique investissent une cinquantaine de millions de livres sterling en Afrique du Sud pour créer une industrie de récupération [4] d'uranium dont la première usine fonctionne dès 1952, et dont la capacité totale de production représente un chiffre d'affaires du même ordre que celui de la production d'or, c'est en dire l'importance sur le plan économique local.

A partir de 1953, des gisements d'uranium sont trouvés en Australie et d'autres très importants au Canada, en particulier dans la région de Blind River dans l'Ontario; rapidement mis en exploitation, ils vont dès 1956 mettre le Canada en tête des fournisseurs d'uranium du monde occidental, pour peu de temps d'ailleurs, car des gisements plus riches sont trouvés en 1955 aux États-Unis, qui prennent de ce fait la première place à partir de 1960.

Ces nouvelles ressources en uranium vont servir à alimenter trois usines, les plus coûteuses du monde, qui vont être construites à partir de 1951 par l'industrie privée. Ce sont deux immenses usines de séparation isotopique, situées à Paducah (Kentucky) et Portsmouth (Ohio), coûtant près d'un milliard et demi de dollars chacune. Par ailleurs à Savannah River (Caroline du Sud), vont être réalisées de grandes piles à eau lourde pour la production de plutonium et de tritium.

La modération de ces piles entraînera en 1951 la cons-

solvants organiques ont pris aujourd'hui une importance industrielle qui dépasse le domaine des matériaux de l'énergie nucléaire.

4. La caractéristique de cette récupération est l'utilisation de sables à un quart pour mille en uranium, dont l'or a été extrait par traitement au cyanure et qui se présentent sous forme de véritables collines à Johannesburg et autour des grands centres miniers aurifères. L'acide sulfurique nécessaire pour le traitement de ces sables (près de mille tonnes par jour) provient luimême de pyrites contenues dans ces mêmes sables et extraites par flottation. L'ensemble représente le plus grand tour de force d'utilisation des résidus que l'industrie chimique ait sans doute jamais réalisé.

truction de deux grandes usines d'un type nouveau [5] pour la séparation isotopique de l'eau lourde. Elles ont coûté chacune environ cent cinquante millions de dollars, et sont aujourd'hui arrêtées, les stocks américains étant considérables eu égard aux besoins actuels.

Pour financer un tel programme, le budget de la Commission atomique allait repartir en flèche : un milliard de dollars pour 1951, deux milliards pour 1952, quatre milliards pour 1953, pour redescendre à deux milliards pour 1954 et plafonner ensuite à ce niveau pendant plusieurs années. En 1954, les constructions réalisées aux U. S. A. pour le compte de la Commission atomique représentent plus de 5 % des constructions nationales; 5 % de tout l'acide sulfurique produit et 7 % de tout le nickel du pays lui étaient réservés. En 1956, après que les nouvelles usines ont été mises en marche, la production de matières fissiles américaines consomme, surtout pour la séparation isotopique, cinquante milliards de kilowatt-heures par an, soit 10 % de la production électrique américaine et 100 % de la production française totale à cette date.

Parallèlement à l'accélération de la production des matières fissiles et à la mise au point de la bombe H, se poursuit aux U. S. A. le programme de perfectionnement de l'arme atomique classique. La réalisation d'une gamme d'engins de puissance comprise entre le vingtième et vingt fois celle de l'arme utilisée en 1945, c'est-à-dire entre un kilotonne [6] et une demi-mégatonne, est mise à l'étude. La réduction de l'encombrement des bombes a fait également de gros progrès, ainsi qu'en témoigne l'achèvement en 1952 d'un obus atomique de deux cent quatre-vingts millimètres de diamètre.

Après la septième explosion expérimentale américaine en 1951, les essais ont pris une cadence accélérée, tant au Pacifique que sur un site nouveau dans le désert

5. Le procédé utilisé fait intervenir la différence de concentration en deutérium obtenue en dissolvant de l'hydrogène sulfuré dans de l'eau à deux températures différentes : de nombreux cycles sont nécessaires, ainsi que des matériaux de construction spéciaux pour éviter la corrosion par l'hydrogène sulfuré.

6. Les unités de puissance explosive nucléaire ont été nommées le kilotonne et la mégatonne, respectivement équivalents à un millier et à un million de tonnes de trinitrotoluène.

du Nevada, à 120 kilomètres de Las Vegas, ville de cinquante mille âmes située à quatre cents kilomètres de Los Angeles et de ses quatre millions d'habitants. De 1951 à 1955, près d'une cinquantaine d'essais ont été réalisés, dont une trentaine sur le sol américain, sans la moindre plainte des populations avoisinantes.

Dès 1951 a lieu au Nevada une première explosion souterraine tandis que les essais aériens y sont effectués à partir de tours de cent à deux cents mètres de haut, ou à partir de ballons jusqu'à cinq cents mètres d'altitude.

Le programme civil se poursuit simultanément par la construction et la mise en marche de réacteurs prototypes pour lesquels les États-Unis ont l'avantage de disposer de quantités importantes d'uranium 235 et de pouvoir utiliser ainsi dans leurs réacteurs de l'uranium dit enrichi, c'est-à-dire plus concentré en uranium 235 que l'uranium naturel.

En 1951, neuf années après la mise en marche de la pile de Fermi, une première réalisation de production d'électricité a lieu à la station d'essai d'Arco. Le refroidissement est assuré par du sodium fondu au sein d'un réacteur à uranium enrichi; l'énergie produite est transmise par l'intermédiaire de vapeur d'eau, à une turbine de cent kilowatts; l'énergie électrique produite suffit à éclairer le bâtiment.

En 1953, le commandant Rickover, dont la persévérance n'avait d'égale que son exigence vis-à-vis de la qualité du matériel commandé, voyait s'affirmer les chances de réussite de l'entreprise de contruction d'un sous-marin nucléaire par la mise en marche à Arco d'un prototype de moteur nucléaire. Formé de barres d'uranium très enrichi, gainées de zirconium, métal nouveau, résistant à la corrosion de l'eau et refroidies par de l'eau sous pression, ce réacteur atteindra une puissance de quelque cinq mille kilowatts d'électricité [7]. De ce modèle caractérisé par une étonnante sûreté de marche découleront

7. La puissance d'un réacteur peut être exprimée, soit en kilowatts thermiques correspondant à la chaleur dégagée, soit s'il y a production d'électricité en kilowatts électriques représentant la fraction de l'énergie transformée en courant électrique au maximum de 25% à 30% en pratique.

non seulement les réacteurs destinés à fournir l'énergie des sous-marins atomiques mais la série principale des centrales nucléaires américaines (modérées et refroidies à l'eau) dont il fut immédiatement décidé de construire un premier prototype à Shippingport en Pennsylvanie.

Pendant la même période, l'Union Soviétique se lance avec succès non seulement dans la production des armes, mais aussi dans la production d'énergie dans le domaine pacifique. Son effort aboutit à la réussite largement exploitée, de la mise en marche en juin 1954 (à Obninsk, à une centaine de kilomètres de Moscou) de la première centrale nucléaire mondiale. Ce réacteur à uranium enrichi refroidi à eau pressurisée mais modéré au graphite, basé sur un principe voisin de celui du moteur de sous-marin américain, est d'une puissance analogue, cinq mille kilowatts électriques, mais contrairement à son prédécesseur, n'a pas été construit dans un but militaire.

L'industrialisation du programme français.

Jusqu'en 1952, l'orientation du Commissariat à l'Énergie Atomique a essentiellement un caractère scientifique; à partir de 1952, un véritable tournant se dessine et le programme devient industriel.

Joliot-Curie, privé de sa charge en avril 1950, n'est remplacé qu'un an plus tard par Francis Perrin, nommé haut commissaire. Pionnier de l'énergie atomique, membre du Comité de l'Énergie Atomique depuis la fondation du C. E. A., ce dernier va être, par ses connaissances étendues dans tous les domaines de la science, particulièrement indiqué pour présider aux destinées scientifiques de cet organisme si polyvalent, qu'il guide encore aujourd'hui.

Pendant les années 1949 à 1952, le personnel du C. E. A. s'accroît de 60 % et atteint mille huit cents agents fin 1952. La seule pile achevée durant cette période est du même type que ZOÉ : EL 2 (Eau Lourde 2) d'une puissance de 2 000 kilowatts thermiques, installée à Saclay, dont les barres, en uranium métal cette fois, sont refroidies par du gaz carbonique comprimé, procédé utilisé pour la première fois au monde et qui est maintenant mis en œuvre dans toutes les piles industrielles britanniques et fran-

çaises. Cette pile fonctionne en 1952 au nouveau centre de Saclay où sont installés des accélérateurs de particules van de Graaf et cyclotron, outils indispensables pour le physicien nucléaire moderne.

La pile EL 2 est un instrument précieux de recherche, car elle permet non seulement de fabriquer des radio-éléments artificiels en beaucoup plus grande quantité que la pile ZOÉ, mais encore d'aborder le domaine le plus important de la recherche nucléaire appliquée, celui du comportement sous l'effet combiné de la température et des radiations des matériaux destinés aux futures centrales de puissance.

Ces études ne peuvent être menées à bien que dans des réacteurs de recherche encore plus poussés qu'El 2 et, en 1954, il est décidé de construire à Saclay un nouveau réacteur, EL 3, d'une puissance de quinze mille kilowatts thermiques à eau lourde et uranium métal légèrement enrichi (de provenance anglaise); il sera achevé en 1957 et sera pendant longtemps le meilleur outil du C. E. A. en ce domaine. Dans EL 3 comme dans EL 2, la chaleur produite n'est pas récupérée.

Tandis que les réacteurs de recherche de faible puissance comme ZOÉ ont coûté quelques centaines de millions d'anciens francs, les réacteurs d'essais de matériaux comme EL 3 vont atteindre des prix supérieurs à cinq milliards d'anciens francs et, pour ces derniers le coût des recherches faites grâce à leur fonctionnement est très élevé, à l'échelle du coût même du réacteur.

La France n'étant pas astreinte aux règles du secret adoptées par les trois pays anglo-saxons put rendre publics les résultats de ses recherches et la description de ses réacteurs nucléaires. Le C. E. A. le fit avec pondération et ses publications eurent souvent l'intérêt supplémentaire de provoquer une sortie du secret des résultats anglo-saxons dans les mêmes domaines.

La condition essentielle du développement indépendant du programme nucléaire français est réalisée durant cette même période par le succès des prospections minières dans la métropole. Au long d'une ligne en V qui va de la Bretagne, par la Vendée, vers le Limousin et le Forez et remonte jusqu'en Alsace, sont découverts des gisements

dont les ressources connues à ce jour sont restées, en gros, proportionnelles aux crédits destinés à la prospection. La production française d'uranium ne sera donc, dans ce premier stade, limitée que par l'importance des crédits affectés.

Une première usine de traitement de minerais à quelques pour cent de teneur en uranium sera alors construite dans l'ensemble du Bouchet où l'année 1952 voit la production des premières dizaines de tonnes d'oxyde et de métal de haute pureté à partir de ressources nationales. Parallèlement, l'industrie privée réussissait la mise au point de la préparation du graphite nucléairement pur [8].

Mais la grande tâche réalisée de 1946 à 1952 a été pendant sept ans la formation d'équipes de chercheurs et d'ingénieurs sur lesquelles va pouvoir s'appuyer le Commissariat au moment de prendre un très important essor.

Le véritable démarrage industriel du Commissariat à l'Énergie Atomique s'effectue sous l'impulsion du jeune secrétaire d'État Félix Gaillard, qui depuis 1949 n'avait cessé de faciliter à la Commission des Finances de l'Assemblée Nationale l'attribution de budgets d'importance croissante pour le C. E. A. Devenu responsable de l'énergie atomique pendant l'été 1951, au moment où venait de se produire la mort de Raoul Dautry, l'un des fondateurs du C. E. A., il nomme à la place de ce dernier l'un des plus brillants administrateurs techniciens français, Pierre Guillaumat. Ce dernier assumera la fonction d'administrateur général jusqu'en 1958, puis deviendra à son tour en 1960 le ministre responsable du C. E. A.; il jouera un rôle prépondérant dans l'industrialisation et le développement accéléré du C. E. A.

8. Le graphite de pureté nucléaire, c'est-à-dire ne comportant que des traces infimes d'impuretés susceptibles d'absorber des neutrons, est obtenu dans les usines normales de fabrication de graphite de synthèse, mais nécessite un choix judicieux de matériaux de départ (coke de pétrole et brai), des températures de cuisson plus élevées, et enfin une hygiène sévère de toutes les phases de la fabrication. Le produit obtenu vaut environ cinq nouveaux francs le kilo.

Félix Gaillard, conscient qu'aucune grande puissance ne peut rester en dehors de la révolution atomique, décide de doter la France d'un véritable plan quinquennal nucléaire; celui-ci, atteignant près de quarante milliards d'anciens francs, est voté par le Parlement en 1952.

Nos travaux antérieurs, et l'état d'avancement de nos prospections minières permettant de compter sur une production annuelle de trois cents tonnes d'uranium vers 1957, nous fixaient alors assez naturellement la voie à suivre pour le programme quinquennal : celle de l'uranium naturel et de la production du plutonium. La voie de la séparation isotopique est à cette date impossible à envisager : pas plus l'uranium que les connaissances nécessaires et surtout que les moyens financiers ne sont disponibles. Il est donc décidé de construire dans un site nouveau, à Marcoule près d'Avignon, deux grandes piles de cinquante mille et cent mille kilowatts thermiques; elles seront modérées au graphite, dont la fabrication industrielle française est au point, contrairement à celle de l'eau lourde. Les deux piles sur lesquelles on n'envisage aucune récupération d'énergie sont destinées à la production de plutonium, dont l'extraction nécessitera une usine de traitement des combustibles irradiés qui complétera l'ensemble.

Le but clairement précisé était la production de plutonium destiné à être utilisé dans des réacteurs ultérieurement construits : centrales et moteurs. L'exposé des motifs du plan concluait en ces termes : « Il dépend de nous aujourd'hui que la France reste un grand pays moderne dans dix ans. » Dix ans plus tard, la première centrale électronucléaire de l'Électricité de France sera achevée, et le pays sera depuis deux ans en possession de l'arme atomique. Le plan quinquennal de 1952 ne mentionnait aucune utilisation éventuelle du plutonium pour des buts militaires, une décision à ce sujet n'ayant pas à être prise avant plusieurs années, mais il est certain que cet aspect du problème atomique était présent, et sans doute prédominant, dans l'esprit des responsables et des inspirateurs du plan.

Les projets furent assez rapidement modifiés en faveur d'une utilisation de la série des piles G (au graphite)

pour l'étude expérimentale de la production d'électricité à partir de la chaleur dégagée. Dès fin 1952, il est décidé que G 1 sera une pile refroidie par l'air à la pression atmosphérique, mais que G 2, en raison de la bonne marche du refroidissement par gaz comprimé de la pile EL 2 de Saclay, sera une pile plus chaude refroidie par le gaz carbonique sous pression. La décision d'adjoindre à G 2 comme à G 1 une centrale de récupération d'électricité est prise fin 1953 au moment où l'on commence à concevoir un kilowatt électrique nucléaire compétitif pour un avenir pas trop lointain.

Sur le plan des relations extérieures, il est regrettable que pendant toute la période de 1948 à 1954, la France, principal pays européen non lié par la politique du secret et possédant des piles de recherche d'importance, n'ait pu prendre la tête d'une large collaboration européenne et jouer ainsi le rôle que lui laissait le Royaume-Uni empêché par ses engagements envers les U. S. A. Mais le C. E. A. resta longtemps isolé, même après le départ de Joliot-Curie, ses éventuels partenaires européens craignant d'aliéner leur chance d'une future collaboration avec les pays anglo-saxons en s'alliant avec nous.

C'est ainsi qu'il ne fut pas possible à la France de participer en 1950 à la seule alliance atomique qui ait vu le jour après la guerre, celle entre la Norvège et la Hollande; le premier de ces pays est un producteur d'eau lourde, tandis que la Hollande possédait dix tonnes d'oxyde d'uranium achetées avant la guerre et soigneusement cachées ensuite. L'union aboutit à la construction d'une pile expérimentale dont la conception fut inspirée de la pile ZOÉ et qui fut mise en route pendant l'été 1951 au centre de Kjeller en Norvège. Le Royaume-Uni apporta sa première contribution technique à un effort européen par la transformation en uranium métal pur de l'oxyde fourni par la Hollande.

Le dernier effort important à cette date fut celui de la Suède qui acheva en 1954 à Stockholm, mais dans un laboratoire souterrain, la construction d'une pile analogue à la norvégienne; l'uranium provenait de minerais pauvres

mais abondants en Suède, les schistes bitumineux; la transformation en métal en fut effectuée en France, en attendant la mise sur pied de l'industrie suédoise de l'uranium métal.

Trois autres accords d'une certaine importance furent conclus par le C. E. A. durant cette période, le premier en 1949 rendait possible avec l'agrément du gouvernement portugais l'achat au Mozambique de minerai d'uranium et nous fournissait quelques précieuses tonnes avant le démarrage de la production nationale française; le deuxième établissait dès 1951 avec la Commission atomique indienne une collaboration dans le domaine des piles modérées à l'oxyde de beryllium[9]; le troisième établissait à partir de 1953 des échanges techniques avec la Commission atomique israélienne pour l'étude de la préparation de l'eau lourde et pour le traitement des minerais pauvres.

Ainsi, jusqu'en 1954, les relations atomiques entre nations freinées par le secret restèrent très limitées. Toutefois, un événement de première grandeur dans le domaine de la collaboration scientifique internationale se produisit en 1953 sous l'influence des physiciens nucléaires européens, et particulièrement de Pierre Auger : la fondation entre douze pays européens, dont la Yougoslavie, de la première entreprise commune scientifique internationale : l'Organisation Européenne de la Recherche Nucléaire (C. E. R. N.) [10] dont l'Angleterre et la France vont assurer à égalité près de la moitié des dépenses. Son activité ne relève pas de l'énergie nucléaire proprement dite, c'est-à-dire des conséquences de la fission de l'uranium, mais de la physique fondamentale de l'atome, car son principal objectif va être la construction à la frontière franco-suisse à Genève d'un accélérateur de particules géant, qu'aucun des pays membres n'avait les moyens

9. L'industrie française a mis sur pied la préparation de l'oxyde de béryllium nucléairement pur, matériau réfractaire coûteux qui sous forme de briques pourrait représenter un modérateur dont l'efficacité est intermédiaire entre celles de l'eau lourde et du graphite.

10. C. E. R. N. pour Centre Européen de la Recherche Nucléaire.

financiers et surtout humains pour mener à bien seul et rapidement. Terminé en fin 1959, le synchrotron à protons de plus de deux cents mètres de diamètre a été, avec vingt-neuf milliards d'électrons-volts, plus puissant au jour de son achèvement que les machines existantes aux U. S. A. et en U. R. S. S. D'ailleurs, le plus grand accélérateur soviétique de dix milliards d'électrons-volts, achevé en 1957 à Dubna, près de Moscou, est devenu aussi l'objet d'une entreprise commune car, après avoir été construit par l'U. R. S. S., il est géré et subventionné par un Institut unifié pour la Recherche nucléaire qui comprend l'U. R. S. S. et ses dix alliés de l'Est dont aucun ne fait partie du C. E. R. N.

L'accélérateur du C. E. R. N. a coûté près de quinze milliards d'anciens francs; sa grande réussite est un symbole, car il représente le premier grand ouvrage scientifique de recherche véritablement conçu, construit et utilisé à l'échelle internationale; de ce fait, il doit servir de précédent à une époque où les progrès de la science et de la technique impliquent des moyens de plus en plus coûteux à l'échelle des seules très grandes puissances ou même du monde entier. C'est ainsi que depuis 1959 on a envisagé la possibilité d'une construction en commun par l'Est et l'Ouest d'un gigantesque accélérateur de quelques centaines de milliards d'électrons-volts qui pourrait être une œuvre autour de laquelle s'établirait une véritable coexistence de travail entre les physiciens nucléaires du monde.

5.

Les années d'euphorie.

1954-1958.

L'imbrication des aspects militaires et pacifiques de l'énergie atomique se trouve démontrée à l'occasion des conséquences de l'explosion de la première bombe à hydrogène soviétique. En effet, ce fait militaire capital sur le plan de la politique internationale a amené un bouleversement dans l'évolution du développement industriel de l'énergie atomique en provoquant l'abandon de la politique du secret dans le domaine des applications civiles.

Les dirigeants anglais et américains furent brusquement conscients de se trouver devant une Union Soviétique prête à réussir avec autant de succès dans le domaine des utilisations industrielles que dans celui des applications militaires, et susceptible d'offrir à des pays étrangers le bénéfice de ses recherches pacifiques; l'application d'une telle politique risquerait de porter des fruits d'autant plus considérables que les États-Unis et le Royaume-Uni se trouvaient alors, du fait de leurs propres législations atomiques, pratiquement empêchés de l'exercer eux-mêmes.

Le prestige lié aux réussites dans le domaine de l'utilisation de l'énergie atomique à des fins civiles a ainsi fait son apparition comme un facteur important de la politique atomique internationale dont il marquera l'évolution au cours des années qui vont suivre la levée du secret. Cette période va être caractérisée par une diminution du rôle des pionniers et des véritables spécialistes au profit des hommes politiques et des responsables du développement industriel des puissances intéressées. Ces der-

niers sont conscients de l'impact de tout ce qui se rapporte à l'énergie atomique civile sur le grand public, ils vont en user parfois avec excès entre 1955 et 1958, véritables années d'euphorie de l'énergie atomique; car ils favoriseront l'accélération des programmes civils au-delà des limites raisonnables imposées par les aspects techniques et économiques, et ils seront responsables de la création, sans doute prématurée, de deux grands organismes atomiques internationaux : l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique sur le plan mondial, la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique ou Euratom entre les six pays de la petite Europe.

Parallèlement, le rôle du savant va tendre à diminuer, en faveur de celui de l'ingénieur, dans les travaux atomiques qui relèvent de plus en plus de la recherche appliquée et représentent la traduction industrielle des conséquences de découvertes fondamentales bien établies. L'âge d'or de la recherche atomique (et une partie de son charme) est révolu; les grandes équipes qui s'attaquent aux multiples problèmes techniques de l'industrialisation de la fission de l'uranium n'ont plus l'impression de faire avancer les frontières de la science, mais de s'attaquer à un des grands problèmes de l'avenir, celui de la mise au point d'une nouvelle source presque illimitée d'énergie. Toutefois, d'importantes recherches de science fondamentale, en particulier en physique nucléaire et en biologie, continuent à être utilement financées dans les grands pays à partir de faibles fractions des budgets considérables affectés à l'énergie atomique.

Pour les trois plus grandes puissances atomiques, l'accélération des programmes ne se limite pas pendant cette période au domaine civil et des moyens énormes sont affectés à la mise au point de leurs armes au cours d'une série d'essais qui vont prendre fin en novembre 1958 par un moratoire volontaire sur l'arrêt des explosions.

Des apports croissants du Canada, d'Afrique du Sud et d'Australie s'ajoutent à la production d'uranium du Congo pour alimenter les usines américaines et anglaises de fabrication d'explosifs nucléaires, tandis que de nouveaux gisements d'uranium vont être découverts aux États-Unis.

Par ailleurs, à partir de 1955, la propulsion nucléaire sous-marine s'affirme aux U. S. A. comme un éclatant succès et, en fin 1958, cinq sous-marins atomiques font déjà partie de la flotte américaine tandis que près d'une trentaine sont en construction ainsi qu'un porte-avions, un croiseur, et un contre-torpilleur, qui seront mus par des moteurs nucléaires. Le développement de la navigation marchande nucléaire est moins important et, en fin 1958, deux bateaux atomiques seulement sont en construction dans le monde, un brise-glace en U. R. S. S. et un cargo aux U. S. A.

Enfin, pendant cette même période de 1954 à 1958, les négociations de désarmement continuent à piétiner tandis que s'amplifient les mouvements de propagande contre la fabrication et les essais des armes atomiques.

La levée du secret atomique.

C'est finalement au cours de la Conférence des Bermudes, tenue en décembre 1953, que la décision de renoncer au secret atomique fut officiellement prise entre Eisenhower et Churchill qui représentait un Royaume-Uni possesseur de l'arme atomique depuis un an. Une politique de détente envers la Russie soviétique, puissance atomique de plein droit, allait se traduire sur le plan international par la Conférence des ministres des Affaires étrangères de Berlin au début de 1954, et sur le plan nucléaire par une offre, faite au monde par le Président des États-Unis, de collaboration américaine dans le domaine des applications pacifiques de l'énergie atomique.

La politique américaine d'isolationnisme nucléaire allait néanmoins se prolonger dans le domaine militaire, et il faudra attendre encore plusieurs années, et un nouveau coup de théâtre, celui du *Spoutnik* soviétique en fin 1957, pour que soient apportées les premières modifications à cet aspect de la politique des États-Unis qui continuent à refuser à leurs alliés des connaissances et des techniques d'armements depuis longtemps aux mains du rival soviétique — l'impératif de la non-dissémination des armes nucléaires étant en effet plus fort aux yeux du gouvernement américain que certaines nécessités de ses alliances.

Cette politique n'est d'ailleurs pas différente de celle adoptée indépendamment par l'Union Soviétique envers ses propres alliés.

Le 8 décembre 1953, le Président Eisenhower, à son retour de la Conférence des Bermudes, s'adressait solennellement à l'Assemblée générale des Nations Unies. Dans son discours, il proposait une amorce de désarmement nucléaire par la création d'une Agence Internationale de l'Énergie Atomique, à laquelle les puissances productrices d'uranium naturel et de substances fissiles apporteraient des contributions de ces matériaux prélevés sur leurs propres stocks militaires. Cet organisme aurait à son tour la tâche de répartir ces substances pour le bien de l'humanité en s'assurant, par un contrôle accepté, qu'elles ne seraient utilisées qu'à des fins pacifiques.

Le gouvernement américain venait de s'engager délibérément dans une nouvelle politique, celle de l'aide internationale atomique contrôlée, abandonnant sa politique de huit années de secret dont la réussite soviétique de la bombe H avait prouvé l'inefficacité.

Durant l'année 1954, les négociations pour la création de l'Agence Internationale se poursuivirent par la voie diplomatique entre le gouvernement américain, qui proposa un premier projet de statut et le gouvernement soviétique, qui persévérait dans sa politique de 1946 et demandait comme condition préalable une renonciation solennelle des éventuels signataires à l'utilisation de la bombe atomique à hydrogène, et de toute autre arme de destruction de masse.

En novembre 1954, l'Assemblée générale des Nations Unies recommanda la poursuite des négociations en vue de l'établissement de l'Agence Internationale et décida la convocation, sous les auspices des Nations Unies, d'une grande Conférence Internationale sur les Applications Pacifiques de l'Énergie Atomique. L'organisation de cette conférence fut confiée au secrétaire général de l'O. N. U., Dag Hammarskjoeld, assisté d'un petit comité de représentants de sept pays : U. S. A., U. R. S. S., Royaume-Uni, France, Canada, Inde et Brésil. Ce Comité, composé de sept personnalités scientifiques, s'est réuni régulièrement depuis 1955, environ deux fois par an, et est devenu

aujourd'hui le Comité Consultatif Scientifique des Nations Unies; il a joué, jusqu'à la mort de son animateur en fin 1961, un rôle non négligeable dans les relations atomiques Est-Ouest en raison de la présence en son sein à partir de 1956 du chef de l'organisation atomique civile soviétique.

La Conférence, sans doute la plus importante réunion scientifique internationale à ce jour, se tint du 8 au 20 août 1955 à Genève, sous la présidence de Homi Bhabha, chef de la Commission atomique indienne. Celui-ci souligna, dans son discours inaugural, le rôle que devrait rapidement jouer la production d'électricité d'origine nucléaire à la fois dans les pays industrialisés comme dans ceux en voie de développement; il laissa aussi entrevoir dans un avenir plus éloigné l'utilisation pacifique éventuelle de la réaction thermonucléaire de condensation des atomes légers.

Le succès de la Conférence fut immense et consacra le dégel dans les relations atomiques internationales. La date limite du 15 mai avait été fixée pour l'acceptation des résumés des communications; quatre jours auparavant arrivèrent au secrétariat de l'O. N. U. à New York cent communications soviétiques de valeur. Les communications importantes américaines, gardées en réserve jusqu'alors, suivirent. Soixante-treize pays participèrent avec mille cinq cents délégués, comprenant de nombreux savants de l'Est et de l'Ouest qui se rencontraient pour la première fois. Près de cinq cents communications originaires de plus de trente pays furent présentées oralement sur un total de plus de mille reçues. Le secret fut aboli dans de nombreux domaines : physique et technologie des réacteurs, traitement des minerais d'uranium, extraction du plutonium. Des renseignements toutefois limités furent communiqués sur l'effort atomique soviétique dont on ne connaissait à cette date que la mise en marche de la première centrale atomique de cinq mille kilowatts électriques en juin 1954.

Devant une telle réussite, il fut décidé d'organiser une deuxième conférence analogue trois ans plus tard, spécialement pour permettre de suivre les progrès réalisés dans la production d'électricité d'origine nucléaire.

Les communications et les débats avaient montré la multiplicité des solutions envisagées pour les futures centrales nucléaires en fonction de leurs principaux éléments constitutifs : combustibles, modérateurs et fluides de refroidissement. Une centrale nucléaire est analogue à une centrale thermique car le combustible fissile y joue, sous forme beaucoup plus concentrée, le même rôle que le charbon ou le mazout; la majeure partie de l'énergie de fission y apparaît à l'état de chaleur qu'il faut ensuite transformer en électricité en présence des résidus radioactifs de cette combustion sans oxygène, limitée par le seuil de la masse critique.

De la combinaison des différents facteurs techniques résulte la variété importante de prototypes étudiés dont nul ne pouvait dire en 1955, comme encore aujourd'hui, lequel sera la base de la meilleure solution d'avenir, car on se trouve ici dans une situation analogue à celle de l'époque de la lutte entre le monoplan et le biplan.

Au cours de la Conférence apparut pour la première fois la concurrence des deux grandes voies à suivre, celle des centrales à uranium naturel adoptée par le Royaume-Uni et la France, celle des centrales à uranium enrichi de l'Union Soviétique et des États-Unis.

L'usage de l'uranium enrichi permet de réduire le volume du cœur de la pile en raison de la concentration plus élevée de la matière fissile dans ce combustible nucléaire que dans l'uranium naturel. Il rend possible l'emploi de matériaux classiques, mais plus grands absorbeurs de neutrons, comme l'acier inoxydable pour le gainage, ou l'eau ordinaire comme modérateur et fluide de refroidissement, l'uranium enrichi laissant plus de marge que l'uranium naturel dans le bilan des neutrons.

En revanche, l'uranium 238 à partir duquel se produit le plutonium étant en proportion plus faible dans l'uranium enrichi, les réacteurs à uranium enrichi produisent à puissance égale moins de plutonium que les réacteurs à uranium naturel, et d'autant moins que leur teneur en uranium 235 est plus élevée. Cette donnée technique a une signification politique importante car il s'en déduit que

les réacteurs à uranium naturel représentent un éventuel potentiel militaire plus grand à cause de leur caractère plutonigène accentué et ce fait a joué un rôle certain dans le développement de la technologie nucléaire.

La course aux centrales nucléaires.

Comme bien souvent dans l'histoire des techniques, l'évolution pour l'énergie atomique et les centrales de puissance en particulier s'est effectuée du militaire vers le civil. Les premières piles construites l'ont été dans le seul but d'y produire du plutonium en opérant à la plus basse température possible pour simplifier les problèmes technologiques d'évacuation de chaleur, celle-ci jouant le rôle de sous-produit gênant qu'il fallait éliminer.

Les premières grandes centrales électriques nucléaires, entrées en fonctionnement au Royaume-Uni en 1956, en Union Soviétique en 1958 et en France en 1959, ont été des centrales dites à double objectif permettant des utilisations à la fois militaires et civiles, produisant à partir d'uranium simultanément de l'électricité et du plutonium, tandis que la première grande réalisation nucléaire électrique américaine de 1957 a été une version agrandie du moteur à uranium enrichi du premier sous-marin nucléaire américain.

Ceci souligne l'interférence caractéristique des programmes de défense et des développements atomiques pacifiques, ces derniers ayant largement profité des premiers.

L'année 1955 avait été marquée par la réussite des premiers essais du sous-marin nucléaire américain, ce fut alors le départ en flèche de la course aux centrales nucléaires, départ un peu prématuré, coïncidant avec la publicité extraordinaire qui accompagna la levée du secret atomique. Le gouvernement britannique annonça, en effet, au début de 1955, la mise en route d'un véritable programme d'électrification nucléaire à partir de réacteurs à uranium naturel, dérivant de prototypes de réacteurs plutonigènes militaires en construction.

L'objectif du plan nucléaire britannique était une puissance installée en 1965 de deux millions de kilowatts électriques, car il était alors prévu que dès 1962 ou 1963, le

coût de l'électricité d'origine nucléaire serait compétitif avec celui des centrales thermiques. Cette première tranche ne devait être que le démarrage d'un programme beaucoup plus ambitieux que l'on jugeait indispensable en Grande-Bretagne et dont l'ampleur était telle que l'on prévoyait alors qu'en 1975 près de la moitié de l'électricité du Royaume-Uni serait d'origine nucléaire.

L'effet produit fut considérable : il fut accru par le succès de la Conférence de Genève. La sortie du tunnel sombre de huit années de secret atomique, et l'éblouissement des révélations de cette Conférence, véritable nuit du 4 août de la politique du secret, avaient contribué à jeter un voile temporaire non seulement sur les difficultés politiques mais aussi sur les obstacles techniques et économiques.

Du point de vue économique, des erreurs d'appréciation et peut-être aussi des considérations de prestige qui ne tenaient pas compte de l'absence d'expérience technique industrielle avaient fait croire alors que pour les pays industrialisés européens l'électricité d'origine nucléaire serait compétitive par rapport au coût marginal de l'électricité d'origine conventionnelle, dès le début de la décennie actuelle. L'enthousiasme s'amplifia en 1956 et au début de 1957 le Royaume-Uni annonça le triplement de son programme qui, avec six millions de kilowatts électriques installés en 1965 au coût de neuf cents millions de livres, aurait fourni à cette date près de 25 % de la consommation britannique. Cette accélération était liée à la crise de Suez et au succès remporté en Angleterre par la mise en marche de la première grande centrale nucléaire à fonctionner au monde.

Cependant, à partir de 1956, l'enthousiasme avait gagné le grand public et se manifestait par la spéculation boursière. Les valeurs d'uranium montaient en flèche et il suffisait qu'une grande société industrielle annonçât la création d'un département nucléaire, pour que le cours de ses actions fît un bond en avant. Peu après « ces années folles » de l'énergie atomique, les bénéfices se sont transformés le plus souvent en pertes qui ont laissé chez leurs victimes une certaine rancœur envers l'énergie nucléaire.

L'année 1957 voit l'euphorie britannique gagner l'Eu-

rope au moment où l'énergie atomique et son prestige sont mis à contribution pour servir de champ d'action commun dans les efforts d'intégration des six pays du pool Charbon-Acier. Peu avant les ratifications du Traité instituant la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique, trois personnalités renommées sont chargées d'« établir un rapport sur les quantités d'énergie atomique qui peuvent être produites dans des délais rapprochés, dans les six pays et sur les moyens à mettre en œuvre à cet effet. »

La conclusion étonnamment ambitieuse de ce « rapport des Sages », intitulé « Un objectif pour Euratom », propose l'installation d'une puissance de quinze millions de kilowatts électriques d'origine nucléaire en 1967, soit 25 % environ de la capacité électrique des six pays à cette date. Un des buts poursuivis est la diminution des importations de combustibles classiques et une moindre dépendance vis-à-vis du pétrole du Moyen-Orient. Le rapport a un grand retentissement et contribue à l'enthousiasme général, bien que dès sa publication les spécialistes doutent fortement de ses conclusions beaucoup trop optimistes.

Pendant ces mêmes années, l'effort industriel américain dans ce domaine reste essentiellement qualitatif. La Commission atomique commande à l'industrie ou encourage celle-ci à construire différents prototypes de centrales, toutes d'ailleurs à uranium enrichi. Pour les U. S. A., dont les réserves en combustibles conventionnels sont si importantes, il suffit à la fois de se préparer pour une utilisation assez lointaine dans les régions à électricité chère du pays : Californie et Nouvelle-Angleterre, et pour des exportations plus proches, la menace de la concurrence de l'industrie britannique plus avancée constituant un aiguillon supplémentaire.

Les projets européens sont de ce fait très encouragés, on peut dire même suscités par les États-Unis, car l'Europe des Six pourrait, si le programme des Sages se réalisait, devenir un excellent terrain d'expérimentation pour l'industrie américaine dont la première centrale à uranium enrichi refroidie à l'eau pressurisée, celle de Shippingport en Pennsylvannie, entre en fonctionnement à la fin de 1957 avec une production très coûteuse de soixante mille kilowatts électriques.

L'année 1957 avait par ailleurs vu se préciser un programme français qui, résistant à l'euphorie générale, avait été maintenu dans des proportions raisonnables, visant pour 1965 une puissance nucléaire installée de quelque huit cent cinquante mille kilowatts électriques, soit près de 5 % de la capacité électrique totale du pays à cette date, à partir d'une série de centrales à uranium naturel inspirées des réacteurs de Marcoule et semblables aux britanniques, versions successives améliorées et de plus en plus puissantes d'un même prototype.

L'année suivante, en 1958, un groupe de sociétés italiennes d'électricité se décide à ouvrir un concours pour la fourniture d'un réacteur de cent cinquante mille kilowatts électriques à construire sur la côte méditerranéenne entre Rome et Naples, dans une région où la construction d'une centrale conventionnelle aboutirait à une production d'électricité relativement chère (cinq centimes le kilowattheure). Le concours était placé sous l'égide de la Banque Internationale de Reconstruction et Développement et a fait l'objet de neuf propositions, cinq américaines, trois britanniques et une française. C'est une centrale américaine à uranium enrichi, modérée et refroidie à l'eau bouillante, qui l'emporta avec des garanties de tenue et de coût du combustible nucléaire rendues sans doute possibles par des subventions indirectes; le prix de l'électricité prévu n'est que de 10 % supérieur au prix conventionnel sur le même site.

La deuxième Conférence atomique de Genève se tint pendant l'été 1958; elle fut présidée par Francis Perrin, le haut commissaire de l'énergie atomique français.

Sa réussite fut moins grande que celle de la première en raison de son gigantisme et du trop grand nombre de participants et de communications. L'Union Soviétique et les États-Unis y décidèrent la publication de tous leurs travaux sur la fusion contrôlée, c'est-à-dire les tentatives d'obtention au laboratoire de la réaction de condensation des atomes légers. La Conférence montra que tout espoir d'aboutir rapidement à cette réaction et à son utilisation industrielle était très prématuré, la question étant encore au stade de la recherche fondamentale.

Les communications laissèrent aussi entrevoir un réajus-

tement sur les prédictions de délai de rentabilité de l'énergie nucléaire. Toutefois, l'Union Soviétique y annonça encore un programme de deux millions de kilowatts d'électricité d'origine nucléaire installés pour 1965 et le fonctionnement en Sibérie de la plus grande centrale du monde en 1958, centrale de cent mille kilowatts électriques à uranium naturel, à double objectif civil et militaire. Les révélations furent moins nombreuses en 1958 qu'en 1955, et les communications françaises sur la séparation isotopique ne provoquèrent pas la levée du rideau recherchée dans ce dernier bastion de la politique du secret. Si, d'une façon générale, les derniers nuages de cette politique furent dissipés, ce ne fut pas le cas des brumes du secret industriel. Les contacts humains entre l'Est et l'Ouest complétèrent heureusement les échanges scientifiques et, de ce fait, une telle rencontre utile à la fois sur les plans politique et technique sera peut-être à nouveau organisée, mais dans un délai moins rapproché que celui qui a séparé les deux premières conférences.

Enfin dès la fin de l'année 1958 se sont manifestés les premiers signes de déception des industries anglaise et américaine devant le faible volume de leurs exportations nucléaires. Le changement de conjecture se dessinait; il allait se préciser en 1959 et apporter un ralentissement dans la course aux centrales nucléaires, dont le départ avait sans doute été pris un peu précipitamment. Il ne faut pas le regretter, car ces années ont permis à la technique de faire un bond en avant qui n'aurait sans doute pas été fait en présence d'une évaluation plus exacte de la conjoncture.

Succès et excès de l'entreprise britannique.

Après le succès de l'explosion atomique anglaise de Montebello en 1952, de la mise en marche de l'usine de séparation isotopique de Capenhurst et du bon fonctionnement du centre plutonigène de Windscale, le gouvernement conservateur présidé par Churchill, toujours aussi intéressé par le problème atomique, décida en 1954 de soustraire le Département atomique à l'autorité directe du Ministère des Armements et de la Reconstruction et de créer une organisation nouvelle indépen-

dante. Celle-ci, l'Autorité de l'Énergie Atomique du Royaume-Uni (United Kingdom Atomic Energy Authority), est une véritable entreprise nationale sous la direction d'un président haut fonctionnaire, dont le premier a été Sir Edwin Plowden, un économiste sous l'impulsion duquel l'ensemble de l'organisation devait prendre un essor lui permettant de disposer de près de quarante mille agents en 1960. Sir Roger Makins, ancien ambassadeur britannique aux U. S. A., lui succéda à cette date.

Le grand centre de recherches de Harwell continue alors à se développer et de nombreux réacteurs expérimentaux y sont construits tandis que les recherches militaires se font dans un centre spécialisé à Aldermaston, sous l'égide de l'Autorité, responsable à la fois de la fabrication et des essais des armes. Enfin à Risley, près de Manchester, se trouve le quartier général du groupe industriel responsable de l'étude, de la construction et du fonctionnement des grands ensembles.

L'importance du groupe industriel est due au fait caractéristique que l'Autorité a été son propre architecte industriel pour la construction de tous ses établissements et de leurs laboratoires, des réacteurs de recherche, des réacteurs plutonigènes, de l'usine de séparation isotopique et enfin des prototypes de réacteurs de puissance. Le rôle de l'industrie privée dans la construction de ces grands ensembles réalisés par l'Autorité a été de ce fait moins important qu'en France ou aux U. S. A., et le groupement industriel de l'Autorité a même, en plus de ses bureaux de dessin, ses propres laboratoires de recherche, pouvant entraîner parfois une certaine compétition avec ceux de Harwell.

Il avait été décidé en 1953 que l'Autorité construirait à Calder Hall, à côté de Windscale, plusieurs réacteurs plutonigènes modérés au graphite, alimentés à l'uranium naturel gainé au magnésium et refroidi au gaz carbonique comprimé, avec récupération de chaleur et production d'électricité : trente-cinq mille kilowatts électriques par réacteur. Ces réacteurs à double objectif allaient servir de prototypes aux réacteurs du programme civil dont l'annonce en 1955 fut le véritable catalyseur des années d'euphorie.

Toutefois, pour les réacteurs du programme civil, l'industrie électrique nationalisée britannique, la Central Electricity Authority, s'est adressée, contrairement à l'Autorité Atomique, à l'industrie privée; celle-ci a constitué cinq groupements d'entreprises respectivement responsables des cinq premières centrales dont la construction, s'échelonnant sur une durée de quatre ans, devait être commencée pour les premières en 1957, pour la dernière en 1960. Ces groupements privés seront ensuite bien placés pour les futures exportations sur lesquelles le gouvernement britannique fonde alors de grands espoirs qui s'avéreront trop optimistes.

En octobre 1956, la reine Élisabeth inaugura officiellement le premier réacteur de Calder Hall; il est alors de beaucoup le plus puissant générateur d'électricité d'origine nucléaire au monde, et de plus d'un an en avance sur son rival américain. La décision de tripler le programme britannique d'électrification nucléaire devait suivre de quelques mois. Cette réussite certaine est accentuée après l'explosion, en mai 1957, de la première bombe à hydrogène aux îles Christmas dans le Pacifique, le Royaume-Uni devenant ainsi le troisième membre de plein droit du Club atomique.

Les premiers nuages devaient cependant bientôt apparaître. Le 10 octobre 1957, un des deux réacteurs plutonigènes de Windscale prend feu au cours d'une opération de réchauffage, faite en vue de diminuer les contraintes et l'énergie accumulée dans le graphite sous l'effet des radiations. Des produits de fission s'échappent dans le voisinage; il n'est heureusement pas nécessaire d'évacuer les populations avoisinantes, mais pendant plusieurs semaines le lait des vaches, dans une zone de quelque cinq cents kilomètres carrés, dut être interdit à la consommation humaine. C'est la première fois qu'un accident nucléaire a eu des répercussions à l'extérieur d'un établissement atomique et le grand public en a été très frappé.

L'année 1958 voit les premiers signes de la régression et les Britanniques sont battus par leurs concurrents américains lors de la première adjudication internationale d'une centrale de puissance, celle de l'Italie du Sud.

Enfin, au début de 1958, Sir John Cockcroft annonce

officiellement que les physiciens de Harwell ont réussi à provoquer au laboratoire la fusion contrôlée des atomes d'hydrogène lourd dans un appareil électromagnétique complexe dénommé Zeta. L'émotion est considérable, l'uranium va-t-il être détrôné avant même d'avoir pris son développement industriel? et les milliards dépensés pour son utilisation à des fins pacifiques l'auront-ils été en vain? Quelques mois plus tard, l'Autorité britannique est obligée de reconnaître que l'expérience avait été mal interprétée et qu'aucune réaction thermonucléaire n'avait eu lieu; il en subsistera néanmoins une nouvelle raison pour le public d'avoir un certain doute envers les prédictions d'avenir en ces domaines qui lui sont si étrangers.

Accélération et militarisation du programme français.

Pendant les années d'optimisme, l'effort atomique français a été fortement accru. Cette accélération considérable coïncida avec la décision d'engager la France dans un programme militaire et se traduisit par une participation notable des forces de la nation.

Le plan quinquennal de 1952 allait assurer à la France, vers la fin de la décennie, du plutonium en quantité d'importance militaire. Certains responsables de la défense nationale qui avaient favorisé un tel programme auraient voulu alors faire créer sous leur autorité, pour les applications militaires, un organisme distinct du C. E. A., malgré l'ordonnance de base de 1945 qui donnait au C. E. A. le monopole dans tous les domaines d'utilisation de l'énergie atomique. Pierre Guillaumat, l'Administrateur Général, attira en 1953 l'attention du gouvernement sur l'importance et l'urgence des premières décisions à prendre dans le domaine militaire et la nécessité absolue d'y laisser le C. E. A. chef de file; il devait aussi souligner certains inconvénients du traité de la C. E. D. qui, s'il avait été mis en vigueur, aurait soumis à des autorisations internationales le fonctionnement même du centre de Marcoule.

Au début de l'année 1954, René Pleven, ministre de la Défense nationale, envisagea que le gouvernement examine à fond l'ensemble du problème posé par la

fabrication d'armes nucléaires pour un pays comme la France.

Le 23 octobre 1954 sont conclus les accords de Paris, qui, entre autres, créent l'Union de l'Europe occidentale entre les Six et l'Angleterre et instituent sur le seul continent européen un contrôle de la production et du stockage des armes atomiques au sens large du terme, la matière fissile entrant dans la définition de l'arme. Un des buts de ce contrôle, qui n'a pas été mis en application jusqu'à ce jour, est la vérification de la neutralisation de l'Allemagne en ce domaine; le Royaume-Uni participe à l'application du contrôle sans avoir d'ailleurs à le subir lui-même.

Tout à fait à la fin de cette même année, le 26 décembre 1954, Pierre Mendès-France, président du Conseil depuis juin, très conscient du décalage sur le plan international entre les puissances atomiques et les autres, décida, à la suite d'une large consultation interministérielle, de soumettre à l'accord de son gouvernement la construction de la bombe et du sous-marin nucléaires. La chute du ministère devait l'empêcher de mettre son projet à exécution.

En 1955, le gouvernement suivant présidé par Edgar Faure ne reprit pas le précédent projet relatif à la fabrication d'une bombe atomique française. Une des raisons mises en avant était la vague éventualité de la réalisation d'une bombe européenne. Le ministre chargé de l'Énergie atomique, Gaston Palewski, toutefois, fit plus que doubler, et porter à cent milliards de francs, le premier plan quinquennal du C. E. A., et décida la construction d'un sous-marin atomique ainsi que la mise en route secrète des premières études militaires. En 1956, le gouvernement Guy Mollet, après avoir envisagé une renonciation unilatérale à l'arme atomique, laissa se poursuivre et s'amplifier les recherches militaires. En juin 1956, le Conseil de la République adopta à une très large majorité une proposition de loi tendant à créer une division militaire au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique. Deux semaines plus tard, le gouvernement Mollet, au cours d'un débat sur l'Euratom, rendit officielles les recherches françaises sur les utilisations militaires, mais

prit l'engagement de ne pas faire exploser de bombe française avant 1961.

En 1957, Georges Guille, secrétaire d'État chargé de l'Énergie atomique dans ce même gouvernement Mollet, obtint, en même temps que la ratification du Traité d'Euratom, un deuxième plan quinquennal prévoyant un budget atomique français total de cinq cents milliards d'anciens francs à dépenser en cinq ans. Ce plan comprenait les premiers crédits destinés à la création d'une usine de séparation isotopique. Finalement en 1958, en l'absence de tout progrès réel dans la négociation du désarmement nucléaire, Félix Gaillard, en tant que chef du gouvernement, prit la décision, confirmée plus tard et fortement appuyée par le général de Gaulle, de construire et d'expérimenter en 1960 la bombe au plutonium, devenue ainsi un des aboutissements du plan quinquennal dont il avait lui-même doté le C. E. A. six ans auparavant.

La condition essentielle de la réalisation de ce programme était la réussite du complexe industriel de Marcoule, tâche principale du C. E. A. pendant ces années. La pile G 1 de quarante mille kilowatts thermiques diverge en début 1956, la pile G 2 de deux cent mille kilowatts thermiques en 1958, suivie, environ un an après, par son analogue, la pile G 3, dont la construction avait été décidée en 1955 pour porter la production de plutonium à un niveau suffisant à la fois pour les utilisations civiles et surtout militaires. L'Électricité de France est associée à cette entreprise pour la production annexe de quelques milliers de kilowatts d'électricité pour G 1, et d'une trentaine de milliers[1] pour G 2 et pour G 3. Dès 1958, G 1 produit les premiers kilowatts électriques nucléaires français.

Une grande usine d'isolement du plutonium à partir des barreaux irradiés entre en fonctionnement en 1958 et est ainsi adjointe aux trois réacteurs dont la production nominale en marche continue est d'environ un tiers de kilogramme de plutonium par jour. Pour sa réalisation,

1. La production nette d'électricité fournie au réseau par les deux piles G 2 et G 3 a atteint à partir de 1962 soixante-dix mille kilowatts et correspond ainsi au cent-cinquantième de la production nationale d'électricité.

l'industrie chimique française a su s'adapter à la conception nouvelle d'une usine entièrement contrôlée à distance qui doit être à l'épreuve de toute panne. Le C. E. A. a donné à la Conférence de Genève, en 1955, la primeur de la description de la méthode utilisée, forçant ainsi la levée du secret en cette matière. Le procédé découle, comme le procédé utilisé au Royaume-Uni, de nos travaux au Canada à la fin de la guerre et est basé sur les cycles d'extraction par solvants organiques qui sont aptes à séparer l'uranium et le plutonium après la dissolution des barres irradiées dans l'acide nitrique, et aboutissent d'une part à de l'uranium décontaminé des produits de fission (lequel pourra, s'il n'est pas trop appauvri en uranium 235, être retransformé en uranium métal et être à nouveau utilisé dans une pile), d'autre part à du plutonium lui aussi exempt de produits de fission, et enfin à une solution concentrée des sous-produits radioactifs; ceux-ci sont stockés dans de grandes cuves souterraines à double enceinte, refroidies en raison de l'énergie dégagée par leur radioactivité, dans l'attente d'une lente décroissance de cette dernière ou d'une éventuelle réutilisation.

Le plutonium émet un rayonnement peu pénétrant; il doit néanmoins, en raison de sa toxicité, être manipulé dans des dispositifs spéciaux entièrement fermés dits « boîtes à gants » où l'opérateur ne peut intervenir que par ses mains gantées et suit l'opération à travers une vitre en matière plastique; l'élément fissile y subit une concentration finale et est ensuite transformé en métal infiniment pur si l'on envisage de l'utiliser pour des fins militaires, ou mis sous forme d'alliages métalliques ou de mélanges d'oxydes s'il doit servir ultérieurement dans une pile.

Les conditions de production du plutonium ayant été définies au début du plan quinquennal, le C. E. A. aborda dès 1952 l'étude de la séparation isotopique de l'uranium dont les premiers travaux furent confiés au Service des Poudres. Au début de 1955, une négociation s'ébaucha avec le Royaume-Uni pour la construction d'une usine de diffusion gazeuse en France; l'Autorité de l'Énergie Atomique britannique, malgré son désir d'obtenir pour son industrie un marché si important, dut y renoncer en raison

des accords anglo-américains s'opposant à l'aide d'une tierce puissance dans un domaine d'implication militaire.

Parallèlement à son effort industriel, se poursuivait la tâche du C. E. A. dans le domaine de la prospection et la production d'uranium, ainsi que son programme de recherches fondamentales. Le centre de Saclay prit alors son plein épanouissement avec la construction et la mise en marche, en 1957, de la nouvelle pile de recherche à haut flux EL 3 ainsi qu'avec celle d'un grand accélérateur de particules, un synchrotron à protons de trois milliards d'électrons-volts qui fut achevé en 1959. Enfin en 1955, il fut décidé dans un but de décentralisation de fonder à Grenoble un nouveau centre d'études nucléaires destiné à travailler en collaboration étroite avec Saclay ainsi qu'avec l'ensemble universitaire et industriel particulièrement actif dans la région de l'Isère.

La réalisation de cette phase du programme français a été rendue possible grâce à une véritable mobilisation de l'industrie privée française. Celle-ci emploie pour ses réalisations atomiques un personnel aussi important que celui du Commissariat qui est à la fois son inspirateur, son commanditaire, son consommateur et souvent même son organisateur en suscitant la création de groupements d'entreprises pour les très grandes tâches.

Les rôles du C. E. A. et de l'industrie se complètent et même se chevauchent car il n'est pas possible, en présence des délais impératifs imposés dans un domaine à évolution si rapide, d'attendre que les études soient achevées par le premier pour que la seconde passe au stade des réalisations. Ainsi, le C. E. A. se consacre surtout aux études de base et aux recherches de laboratoire. L'industrie, pour le relayer et passer aux réalisations pratiques, collabore avec lui dès le stade de la recherche, dans une intimité analogue à celle qui existe dans une même société entre le laboratoire et le bureau d'étude.

Un des aspects intéressants de ces relations avec l'industrie est celui de l'accueil au C. E. A. de ses stagiaires qui permet une meilleure connaissance mutuelle des problèmes et des difficultés de chacun des intéressés, et qui familiarise les ingénieurs des sociétés privées avec les

techniques nouvelles, en particulier celles de la physique des neutrons, des réacteurs et de leurs matériaux, des rayonnements et de leurs effets, de la protection contre ceux-ci et enfin celles de la chimie nucléaire. L'industrie trouve ainsi des avantages techniques aux tâches entreprises pour le C. E. A., ne serait-ce que dans la formation des techniciens en vue de l'utilisation ultérieure des radioéléments artificiels.

La condition essentielle du succès de telles collaborations est qu'elles se fassent dans un climat de confiance et d'estime mutuelles, climat qui s'est chaque fois d'autant mieux établi que les grands dirigeants des entreprises intéressées ont montré qu'ils étaient plus conscients de l'importance à longue échéance du problème et qu'ils étaient attirés dans le travail en commun par cet avenir, plutôt que par quelques bénéfices immédiats. L'intérêt, et parfois l'enthousiasme à participer au développement français des utilisations de l'énergie atomique, manifestés par certains responsables d'organismes industriels ont été quelquefois, plus que la compétence technique, à l'origine du choix qui a été fait de leur société. On peut dire que, dans l'ensemble, que ce soit dans des marchés d'étude, des accords de production, des contrats d'engineering ou de construction d'usines, les collaborations entre le C. E. A. et l'industrie ont été efficaces et fructueuses.

La politique de l'aide contrôlée.

Dans son discours devant les Nations Unies, en fin 1953, le Président Eisenhower s'engagea à modifier la loi atomique américaine afin de rendre possible une collaboration internationale, et dès le début de l'année suivante, il transmit au Congrès un message demandant la modification de l' « Atomic Energy Act » (loi Mac-Mahon) afin de permettre des échanges avec les pays amis dans le domaine atomique civil, échanges que la loi de 1946 rendait pratiquement impossibles.

Ces échanges impliquent la levée des deux verrous de la politique d'isolationnisme atomique : celui des connaissances et celui des matériaux nucléaires. L'impératif de la politique atomique anglo-saxonne : éviter de faciliter l'accession de nouveaux pays au domaine des applications

militaires, n'en subsiste pas moins. Il est alors envisagé que toute assistance nucléaire aura comme corollaire à la fois un engagement pris par le pays bénéficiaire de n'utiliser l'assistance qu'à des fins pacifiques, et un droit pour le pays donateur de contrôler par des inspections que la clause d'utilisation pacifique est bien respectée.

C'est ainsi que, le 30 août 1954, la loi Mac-Mahon fut amendée de façon à rendre possible le transfert à des pays étrangers de matériaux nucléaires et d'informations relatives au domaine civil, après accord du Département de la Défense, du Président des États-Unis et du Comité mixte du Congrès pour l'énergie atomique. Il était entendu que les pays bénéficiaires devraient à la fois garantir que les matériaux ne seraient pas utilisés dans des buts militaires, et accepter un contrôle de l'observation de cet engagement. Il n'est toutefois pas exigé du pays bénéficiaire de renoncer à toute activité militaire, à la condition que celle-ci se déroule dans des installations ou avec des matériaux totalement distincts de ceux fournis par les U. S. A.

Pour cette aide, les États-Unis ont l'avantage d'être le pays à disposer du plus large stock d'uranium 235 utilisable en particulier pour la construction de réacteurs de recherche moins coûteux que ceux nécessitant de l'uranium naturel.

La nouvelle politique adopte le slogan « Atoms for Peace » et, du jour au lendemain, les applications industrielles de l'énergie atomique et l'aide que la collaboration américaine peut fournir aux pays moins avancés désireux d'en bénéficier font l'objet d'une publicité poussée qui, cherchant à faire oublier le péché atomique de 1945, risque peut-être de créer des espoirs prématurés.

Trois modalités sont envisagées pour cette aide à l'étranger : les accords bilatéraux, la création de centres communs régionaux groupant des pays moins avancés et enfin le canal de la future Agence Internationale de l'Énergie Atomique. Dès 1955, et sans attendre la création de l'Agence Internationale, le programme est mis en route, mais devant le prestige qui s'attache de plus en plus à l'énergie atomique et le désir de chaque pays de se lancer indépendamment dans ce nouveau domaine, la politique

des centres communs est vite abandonnée au profit des accords bilatéraux.

De juillet 1955 à la fin de l'année 1958, les États-Unis ont conclu un ensemble d'accords bilatéraux civils avec une quarantaine de pays amis. Deux tiers de ces accords sont dits de recherche et permettent aux pays signataires de se procurer aux U. S. A. les quelques kilos d'uranium 235 nécessaires à la construction d'un réacteur de recherche. Dans plus de la moitié de ces cas, les nations bénéficiaires ont choisi un réacteur de recherche américain, d'un prix en général compris entre un demi et un million de dollars, et ont profité d'une subvention de trois cent cinquante mille dollars offerte par le gouvernement à chaque pays acheteur. Ces réacteurs sont le plus souvent dits du type piscine, du fait qu'ils sont constitués par un cœur en uranium enrichi plongeant dans un large bassin d'eau qui sert à la fois de modérateur, de réfrigérant, de protection contre les radiations et d'enceinte d'expérimentation.

De tels réacteurs de recherche sont de faible puissance et n'ont en général aucune signification d'un point de vue militaire; de ce fait, les opérations de contrôle correspondant consistent en une vérification annuelle de la présence du combustible enrichi, le plus souvent à une teneur de moins de 20 % en uranium 235 à laquelle il n'est pas directement utilisable pour un usage militaire.

Les accords avec les pays avancés, dits accords de puissance, couvrent à la fois l'alimentation en uranium 235 de réacteurs de recherche et celle de réacteurs de puissance pour lesquels des centaines de kilogrammes d'uranium 235 peuvent être nécessaires. La France, en 1956, a passé un accord de recherche portant sur quarante kilos d'uranium 235; il fut transformé en accord de puissance en 1957 et étendu à deux mille cinq cents kilos.

Cette aide américaine pour la fourniture d'uranium enrichi a été accompagnée d'une large communication de données techniques, sorties du secret en même temps que les laboratoires de la Commission atomique américaine et même ceux de l'industrie recevaient comme stagiaires de nombreux jeunes ingénieurs des pays signataires des accords bilatéraux.

L'utilisation des connaissances ne pouvant être vérifiée, seule celle des matériaux nucléaires fournis est l'objet du contrôle et de l'inspection que les pays bénéficiaires acceptent en raison de l'intérêt pour eux de l'aide américaine. Toutefois, pour des accords bilatéraux conclus en temps de paix, l'imposition d'un tel droit de contrôle strict des conditions d'exécution de l'accord représente une sorte d'abandon volontaire de souveraineté de la part des États contrôlés et constitue une innovation caractéristique des aspects exceptionnels de la politique atomique internationale. La politique atomique de l'aide contrôlée a d'ailleurs suscité rapidement des partisans et des adversaires convaincus, les premiers certains d'apporter une contribution à la consolidation de la paix, les seconds hostiles à un concept qui implique dans les relations internationales une certaine méfiance du pays donateur envers le pays assisté.

Les États-Unis ont, de plus, cherché à étendre la politique du contrôle à d'autres matériaux que l'uranium 235 pour lequel ils ont un quasi-monopole; en particulier, ils ont tenté d'obtenir de leurs fournisseurs d'uranium naturel que ceux-ci s'engagent à ne pas en vendre à d'autres pays sans engagement contrôlable d'utilisation à des fins pacifiques. Les producteurs d'uranium désireux de ne rien faire qui puisse nuire à une prolongation de leurs contrats avec les États-Unis et le Royaume-Uni se sont soumis aux exigences américaines.

En 1957, le Canada commença à chercher pour son uranium des clients autres que les États-Unis qui s'étaient engagés à acheter jusqu'en 1962 une très grande part de la production canadienne. Le programme français était alors en pleine expansion et le choix se présenta d'ouvrir une nouvelle mine dans le Forez et de construire l'usine chimique correspondante, ce qui représentait de coûteux investissements, ou bien de passer un important contrat d'achat avec le Canada portant sur mille tonnes d'uranium et renouvelable. La négociation de ce contrat débuta d'une façon satisfaisante pour les Canadiens; la clause d'utilisation pacifique accompagnée d'un contrôle canadien, proposée à la France était acceptable car il s'agissait d'uranium nécessaire au programme des centrales de l'Électri-

cité de France; mais quand on arriva aux conditions financières, les Canadiens nous proposèrent le prix moyen payé par les Américains. A la surprise de ses interlocuteurs, la délégation française répondit qu'elle ne pouvait accepter le même prix que pour la même substance; or, le produit vendu aux États-Unis était exempt de toute restriction d'emploi, tandis que celui qui nous était offert n'était pas libre, ce qui à nos yeux aurait dû entraîner une baisse substantielle de prix. La négociation échoua sur ce point au grand regret des Canadiens qui ne pouvaient, vis-à-vis des États-Unis, vendre leur uranium ni moins cher ni libre. Un tel double prix des matériaux nucléaires, selon que leur usage en est libre ou limité à des applications civiles, allait devenir une conséquence logique de la politique du contrôle.

Ainsi, les États-Unis ont mis sur le marché mondial à partir de 1955 de l'eau lourde au prix de soixante mille dollars la tonne, mais sous condition d'utilisation pacifique, tandis que l'industrie norvégienne qui en produisait vingt-cinq tonnes par an en vendait libre de toute condition d'emploi au Royaume-Uni pour la fabrication des bombes à hydrogène, et à la France pour le sous-marin à uranium naturel dont la construction était envisagée. Le prix de ces ventes était deux fois et demie supérieur au prix américain, ce qui n'empêchait pas la Commission atomique norvégienne d'acheter pour son propre réacteur civil son eau lourde aux États-Unis au prix bas.

Les États-Unis appliquent eux-mêmes cette politique du double prix dans le cas du rachat du plutonium provenant de réacteurs étrangers alimentés par des combustibles américains; ce plutonium, d'après leurs accords bilatéraux, ne peut être utilisé que pour des buts civils, il est payé jusqu'à trois fois moins que le plutonium à usage militaire susceptible d'être racheté aux sociétés privées américaines qui en produisent dans des centrales électriques.

L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

La proposition du Président Eisenhower aux Nations Unies en décembre 1953 en vue de créer une organisation

atomique internationale représente une tentative d'application à l'échelle mondiale de la politique de l'aide contrôlée.

A la veille de la Conférence atomique de Genève de 1955, l'U. R. S. S., initialement peu intéressée, fit savoir qu'elle était prête à participer à une réunion pour établir les statuts d'une telle institution. Cette réunion eut lieu à Washington en février 1956, entre douze pays, les plus avancés dans le domaine nucléaire et les plus importants producteurs d'uranium. Elle élabora un projet de statuts qui furent finalement définis dans une grande conférence tenue au Siège des Nations Unies à New York, en octobre 1956, par les représentants de quatre-vingt-un pays qui les adoptèrent unanimement. Deux points avaient principalement soulevé des difficultés : les principes et modalités du contrôle et la composition du Conseil d'administration du nouvel organisme : le Conseil des gouverneurs. Il fut impossible de limiter ce Conseil à un nombre raisonnable de membres, et la solution adoptée est celle d'une réunion de vingt-trois [2] nations représentant les puissances les plus avancées, les producteurs d'uranium, les pays en voie de développement. Pour la première fois dans les statuts d'un organisme international, la formule de répartition géographique a été précisée par la désignation des huit parties du globe, chacune étant représentée par au moins deux membres dont l'un d'eux est le pays le plus évolué en matière atomique.

Les puissances en voie de développement, dont les intentions sont forcément pacifiques, en tout cas au stade actuel, se plaignirent de ce que le recours à l'Agence et à son contrôle équivaudrait à une nouvelle forme de colonialisme : cela reviendrait à soumettre leurs activités pacifiques au contrôle des grandes puissances atomiques militaires qui, n'ayant aucun besoin de recourir à une assistance de l'Agence, se trouveront elles-mêmes toujours exemptes de tout contrôle.

2. Ce nombre a été porté à vingt-cinq en 1961 pour tenir compte des nouveaux États africains. Les huits régions géographiques sont : l'Amérique du Nord, l'Amérique latine, l'Europe occidentale, l'Europe orientale, l'Afrique et le Moyen-Orient, l'Asie du Sud, l'Asie du Sud-Est et le Pacifique, l'Extrême-Orient.

La délégation indienne à la Conférence de New York ne manqua pas de souligner certains aspects illogiques de la politique de l'aide contrôlée. D'une part, il est peu probable qu'un pays capable de faire l'effort nécessaire pour la production d'une bombe atomique ait besoin, contrairement à ses engagements, de détourner vers cet effort une aide donnée sous condition d'utilisation pacifique. D'autre part, un pays industrialisé pourrait toujours maintenir de la mine à la bombe une chaîne de fabrications nationales libres de tout contrôle, et en même temps se faire aider pour certaines entreprises nucléaires pacifiques, cette assistance pouvant devenir dans une certaine mesure une aide indirecte à son effort militaire. On pourrait en conclure, comme le firent les Indiens, que le concours de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique devrait être réservé aux seuls pays s'engageant à ne pas avoir de programme militaire; cette proposition fut rejetée car, en l'absence d'un désarmement nucléaire mondial, elle paraissait une discrimination qui, de plus, entraînerait un contrôle portant sur toute l'activité nucléaire du pays.

La délégation française avait eu pour instruction de s'opposer au contrôle sur l'uranium naturel, en raison de sa large répartition géographique et de sa pléthore déjà prévisible. Mon intervention porta sur ce point et, d'une façon plus générale, sur une application raisonnable de la politique du contrôle : il fallait que le slogan de l'Agence soit « une fois client, toujours client » et non « une fois contrôlé, toujours contrôlé ». En effet, le plutonium et l'uranium 233 pouvant être régénérés par transmutation de l'uranium et du thorium dans des réacteurs atomiques successifs, il était spécifié dans les statuts que le contrôle pouvait s'étendre à toutes les générations de ces produits, même si l'assistance internationale n'avait été accordée qu'au réacteur initial de la chaîne. J'avais ainsi voulu montrer que l'excès de contrôle empêcherait les pays de s'adresser à l'Agence Internationale et s'opposerait alors à une application raisonnable du principe du contrôle. Le point de vue français, contraire aux thèses anglo-saxonnes, fut appuyé par les pays en voie de développement, l'Inde en tête, et les pays de l'Est sauf l'Union Soviétique qui parut,

au début de la Conférence, adopter le point de vue des autres pays possesseurs de matières fissiles, États-Unis et Royaume-Uni, favorables à un contrôle strict; elle se rallia toutefois aux adversaires du contrôle à la fin de la réunion qui fut très mouvementée : aucune solution unanime n'ayant été trouvée pour une rédaction de l'article relatif au contrôle, la Conférence dut être prolongée de trois jours jusqu'à ce qu'un compromis franco-suisse entre les thèses extrêmes permit une adoption unanime de l'article controversé.

L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (A. I. E. A.) entra en fonctionnement à Vienne en octobre 1957; elle s'inspire d'une philosophie bien éloignée de celle qu'avait conçue Lilienthal dix ans auparavant : la mise en commun des connaissances, des matériaux et des installations n'est nulle part envisagée, tandis que l'inspection et le contrôle y jouent, en théorie, un rôle prépondérant. La conception supranationale du plan Lilienthal-Baruch et le principe de gestion internationale rendaient au contraire l'inspection et le contrôle plus accessoires.

L'A. I. E. A., dans l'esprit de ses créateurs américains, devait être un organisme à la disposition des pays exportateurs de matériaux et de techniques nucléaires désireux d'assortir leur vente d'une clause de non-utilisation militaire, son rôle étant destiné à éviter, en particulier avec l'Union Soviétique, des surenchères dont le contrôle serait la première victime.

Bien entendu, le fait d'être membre de l'A. I. E. A. n'entraîne pour un pays aucune obligation de faire passer par son intermédiaire ni ses exportations ni ses importations nucléaires. En 1957, lors du débat sur la participation française à l'A. I. E. A., il fut demandé par le Conseil de la République que la France ne soumette jamais de demande d'aide à cette organisation sans un accord du Parlement, de manière à garantir que son effort national ne puisse en aucune façon être soumis à un contrôle international auquel pourraient participer des nationaux de puissances non amies. Cette condition ayant été acceptée par le gouvernement, celui-ci fut autorisé à ratifier les statuts de l'Agence.

L'Euratom.

La levée du secret atomique a provoqué en Europe plusieurs tentatives de collaboration multilatérales de caractères fort différents.

Les leaders scientifiques des huit principales commissions atomiques de l'Europe occidentale ont fondé, dès 1954, la Société Européenne de l'Énergie Atomique, sorte de club d'information mutuelle bénévole, sans véritables statuts ni budget : il a pour tâche d'organiser des contacts scientifiques et des colloques restreints et privés destinés à compléter ceux qui se font sur le plan officiel. Ce club, entre 1954 et 1959, s'est étendu par cooptation à treize commissions atomiques européennes; son rôle, à l'abri des influences politiques, a été aussi discret qu'efficace et, fait caractéristique : lors de la réunion de son conseil annuel, la première question à l'agenda est toujours une discussion sur l'intérêt même du maintien de la Société, qui pourrait être dissoute sans difficulté le jour voulu.

C'est au contraire essentiellement les hommes politiques qui ont joué, de 1955 à 1958, le rôle principal dans les négociations d'établissement des deux autres organisations atomiques européennes, l'Euratom entre les six pays de la petite Europe, et l'Agence Européenne de l'Énergie Nucléaire entre les dix-sept membres de l'Organisation Européenne de Coopération Économique (O. E. C. E).

L'Euratom, la plus restreinte mais la plus politique et ambitieuse de ces deux tentatives, est issue de la relance européenne décidée par la Conférence des ministres des Affaires étrangères des six pays de la Communauté Charbon-Acier à Messine en juin 1955, à la suite de l'échec de la Communauté Européenne de Défense (C. E. D.). Une conférence intergouvernementale, à laquelle les Anglais participèrent comme observateurs jusqu'à la fin de 1955, et présidée par le ministre belge Paul-Henri Spaak, se réunit alors à Bruxelles et rapidement concentra son attention sur le marché commun et l'énergie nucléaire. Le renom de l'énergie atomique était alors si grand que chaque organisation internationale désirait y être impliquée, et il paraissait souhaitable d'ajouter à la négociation capitale du Marché commun la mise en pool des efforts

atomiques des six pays intéressés. Le fait qu'il s'agissait d'une technologie à son début avait, pensait-on à tort, l'avantage d'éviter d'y trouver des positions nationales trop engagées et difficiles à concilier.

En effet, l'état d'avancement des recherches atomiques et la ligne politique atomique des six pays étaient déjà très différents. L'Allemagne fédérale venait seulement de recouvrer le 5 mai 1955 le droit de procéder à des recherches atomiques civiles à la suite de la mise en vigueur des accords de Paris, d'octobre 1954, par lesquels elle avait dû en même temps renoncer à toute activité militaire en la matière. L'Italie n'avait qu'un embryon d'organisation et envisageait d'acheter des réacteurs aux États-Unis, tandis que les Pays-Bas, engagés dans leur association déjà ancienne avec la Norvège, n'avaient pas encore mis sur pied un véritable programme national. La Belgique, liée par ses ventes d'uranium aux pays anglo-saxons, venait seulement d'avoir le droit de conserver pour elle-même une fraction de sa production et espérait alors recevoir des États-Unis, en échange des services passés, un traitement très privilégié. Le jour même de l'ouverture à Bruxelles des premières négociations du Traité d'Euratom le 9 juillet 1955, une demande française d'achat d'uranium belge fit l'objet d'une proposition portant sur un tonnage aussi faible que son prix était élevé, près du double du prix mondial à l'époque [3]. Ainsi la France, beaucoup plus avancée que ses futurs partenaires, était alors relativement isolée et seule comme encore aujourd'hui, à manifester un réel désir d'indépendance basé sur un grand programme national mené par un organisme fortement centralisé, déjà assuré de la pleine collaboration de l'industrie privée.

L'union de ces partenaires si différents semblait bien difficile à réaliser aux yeux des spécialistes, mais les puissantes forces politiques œuvrant à l'unité européenne allaient l'assurer. Au début de l'année 1956, les promoteurs français de la relance européenne, Jean Monnet et le président du Conseil Guy Mollet, envisageaient la mise

3. Une vingtaine de tonnes au prix de dix-sept dollars la livre d'oxyde.

sur pied d'une organisation supranationale type Baruch, exclusivement pacifique, qui aurait possédé tous les combustibles nucléaires et aurait été responsable dans les six pays de la production d'électricité d'origine nucléaire.

Dans sa déclaration d'investiture du 31 janvier 1956, Guy Mollet soutint cette proposition et déclara : « Une option préalable est à faire. Faut-il créer une industrie européenne pour permettre la fabrication de bombes atomiques, fabrication qui serait pratiquement irréalisable sur le plan national dans chaque pays en cause? Ma réponse sera claire : non! » Il conclut plus loin que l'Organisation Européenne aura entre autres comme objectif d'établir le système de contrôle qui garantira rigoureusement le caractère pacifique des activités nucléaires européennes. « Quiconque possède le combustible est à même de fabriquer la bombe atomique. En conséquence, le gouvernement demandera qu'Euratom ait la propriété exclusive de tous les combustibles nucléaires et la conserve à travers leurs transformations. »

La combinaison de la condition d'exclusivité pacifique et de la possession de tous les combustibles nucléaires aurait entraîné pour les membres autres que l'Allemagne de l'Ouest une renonciation unilatérale aux applications militaires de l'énergie atomique.

Cette formule, agréable outre-Atlantique puisqu'elle allait dans le sens de la politique de limitation du « Club atomique », était inacceptable en principe pour plusieurs pays, mais particulièrement au Parlement français qui voyait alors se rapprocher le moment où ses réalisations atomiques donneraient à la France, si elle le désirait, l'accès au domaine militaire.

Conscient de cette opposition qui réveillait les arguments des adversaires du traité de la C. E. D., le gouvernement accepta l'éventualité d'un programme militaire français et organisa à l'Assemblée nationale en juillet 1956 un grand débat d'orientation sur l'Euratom où furent entendus Francis Perrin et Louis Armand, président de la Société Nationale des Chemins de Fer qui avait dirigé la négociation d'Euratom en 1955. C'est au cours de ce débat que le président Guy Mollet déclara que la France s'engageait à ne pas procéder avant jan-

vier 1961 à l'explosion d'une bombe atomique, mais il précisa qu'aucune mesure d'Euratom, aucun accord conclu par Euratom ne pourrait restreindre la France dans le domaine des fabrications militaires. Il prévoyait toutefois encore une consultation préalable, non un avis conforme, de nos partenaires avant une décision éventuelle de fabrications militaires.

C'est ainsi que furent abandonnées les clauses qui auraient entraîné la renonciation aux applications militaires ainsi que celles qui aboutissaient à la mise en commun de la production d'électricité d'origine nucléaire, car l'organisation supranationale envisagée était inacceptable également pour les industriels privés des pays où l'électricité n'est pas nationalisée comme l'Allemagne et la Belgique.

Au début de l'année 1956, la Conférence intergouvernementale présidée par Spaak rédigea un rapport sur le marché commun et sur l'énergie atomique, qui contenait les bases des traités à venir. La liberté dans le domaine militaire était respectée et la construction d'une usine de séparation isotopique européenne était recommandée.

Finalement, les objectifs suivants furent approuvés à une Conférence des ministres des Affaires étrangères des Six à Venise en mai 1956 : « Développer la recherche et les échanges d'informations, créer les installations communes nécessaires, assurer l'approvisionnement des industries en minerais et combustibles nucléaires, établir un contrôle efficace des matières nucléaires, instaurer le libre échange des produits et équipements de l'industrie nucléaire ainsi que la libre circulation des spécialistes. »

La rédaction du Traité se fit sur ces bases, non sans discussions longues et laborieuses, principalement sur l'étendue des pouvoirs supranationaux qui seront attribués à la future organisation. Chaque négociateur affirmait que le point de vue qu'il défendait était le plus européen; le comble de l'habileté consistait, pour contrer une proposition, d'en faire une autre qui allait parfois plus loin dans le sens supranational, de façon à passer la mauvaise carte à un autre délégué gêné qui était alors obligé de s'y opposer : c'est l'application du jeu du mistigri à la diplomatie.

Le grand public, pour sa part, ne pouvait suivre l'enchevêtrement des négociations et confondait déjà les multiples organisations internationales atomiques en cours de création; il y était d'ailleurs en général favorable car il est impressionné par l'avance américaine et sensible à l'argument simpliste que l'union fait la force.

Dès la fin de 1955, un comité avait été créé pour étudier la réalisation qui semblait alors s'imposer comme une des principales tâches de la future Communauté : une usine de séparation isotopique européenne. Les principaux partisans du Traité y furent d'abord favorables; parmi ceux-ci, les uns étaient les tenants d'une Europe plus affranchie vis-à-vis des États-Unis, les autres voulaient une Europe très liée aux U. S. A.. Ces derniers devinrent au cours de l'année 1957 hostiles à ce projet, ils préféraient voir les pays européens s'alimenter en uranium 235 aux États-Unis plutôt que de s'engager dans un coûteux projet qui aurait donné un produit d'origine européenne beaucoup plus cher que le produit importé; ils redoutaient surtout les problèmes politiques que poserait la construction d'une entreprise commune dont la production pourrait directement servir à la fabrication de bombes atomiques et à laquelle les États-Unis étaient évidemment opposés. Après deux ans de négociations au sein du comité auquel s'étaient joints en plus des représentants des Six, des délégués de la Suisse, de la Suède et du Danemark, il fallut abandonner l'idée de réaliser une telle entreprise en commun, la France se trouvant seule à y tenir. Sa construction en avait été d'ailleurs approuvée sur le plan national en juillet 1957, en même temps que le vote parlementaire du Traité de l'Euratom.

Ce traité avait été signé en même temps que celui instaurant le Marché commun à la Conférence de Rome en mars 1957; il entra en vigueur le 1er janvier 1958. Sa ratification en France fut grandement facilitée par la large publicité faite autour du rapport des Sages et de ses conclusions favorables à un immense effort nucléaire à entreprendre sans tarder par les six pays, pour combattre le spectre illusoire d'une pénurie proche d'énergie et d'une ponction de devises étrangères qui en aurait résulté.

Le Traité est surtout consacré à la recherche, pour laquelle les six pays s'engagent à fournir dans un budget commun deux cent quinze millions de dollars en cinq ans, représentant pour les plus petits pays une contribution du même ordre que celle consacrée à leur propre effort national. Ce budget, auquel la France participe pour 30 %, doit être utilisé à l'établissement d'un centre commun de recherches et à subventionner des contrats dont les résultats seront la propriété commune des membres de la Communauté.

Les principaux organes de la Communauté sont : le Conseil, la Commission et l'Agence d'Approvisionnement. Le Conseil comprend les six ministres responsables de l'énergie atomique dans les six pays; il est responsable de l'élaboration de la politique de la Communauté et en particulier du programme et du budget qu'il arrête sur proposition de la Commission. La Commission est composée de cinq membres fonctionnaires internationaux, de nationalités différentes, nommés pour quatre ans par les gouvernements d'un commun accord; ils assurent la mise en œuvre du Traité dans le cadre des décisions du Conseil. L'Agence d'Approvisionnement, créée dans l'optique de la pénurie, est chargée d'assurer l'égal accès aux minerais et matières fissiles, sans distinction de but, car l'Euratom, dont l'activité est pacifique, ne s'oppose pas aux activités militaires de ses membres. L'Agence a un droit d'option sur tous les matériaux nucléaires et a le monopole des contrats de fourniture comme de ceux d'exportation.

Par suite d'un vestige de la solution type Baruch envisagée au début de 1956, la Communauté est propriétaire de toutes les matières fissiles autres que l'uranium naturel, c'est-à-dire tout le plutonium et tout l'uranium enrichi, mais le droit de propriété s'arrête à l'entrée de l'arsenal en cas d'un éventuel façonnage pour des buts militaires [4]. Non moins étrange est le droit de contrôle

4. Ainsi, d'après le Traité, et à la satisfaction des juristes, un atome d'uranium 235 pourrait plusieurs fois changer de nationalité; extrait au Limousin dans de l'uranium naturel, il serait français; mais s'il était concentré dans la future usine française de séparation isotopique, il deviendrait européen, à moins que,

de la Communauté, qui s'applique à tout l'uranium et à toutes les matières fissiles mais qui s'arrête lui aussi à l'entrée de l'usine travaillant pour la défense nationale. Ce contrôle n'est plus un contrôle d'utilisation pacifique comme celui de l'A. I. E. A. dont il est inspiré, mais un contrôle de conformité à l'utilisation déclarée, qu'elle soit militaire ou pacifique.

Dès la mise en vigueur du Traité, Louis Armand, qui en présida en 1958 la première Commission, chercha à appliquer une partie du programme du rapport des Sages, dont il est un des trois auteurs. Aux yeux de la Commission, qui ne tient pas assez compte de l'acquis français de Marcoule, la construction souhaitable pour 1965 d'au moins une demi-douzaine de centrales de quelque cent cinquante mille kilowatts chacune ne peut se faire qu'en s'appuyant fortement sur les États-Unis. D'où, en 1958, la négociation entre l'Euratom et la Commission américaine et la conclusion d'un accord, dit accord U. S. A.-Euratom, dont la réussite aurait contribué à faire pénétrer en Europe des Six l'industrie américaine sans encourager la recherche de formules véritablement européennes. L'accord est accompagné d'avantages financiers et d'un programme de recherches, financé en commun, de cent millions de dollars; il concède à Euratom le droit d'assurer le contrôle de l'utilisation pacifique de l'uranium 235 fourni : marque de confiance et de faveur des États-Unis pour l'organisation européenne que ressentirent durement les partisans américains de la politique de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

Contrairement à ce qui s'est passé pour l'Euratom, les forces politiques de l'Europe des Six et d'outre-Atlantique se penchèrent moins sur les négociations atomiques qui se déroulèrent entre les dix-sept membres de l'O. E. C. E. (dont le Royaume-Uni et les Six) pendant la même période de la mi-1955 à la fin de 1957. Elles devaient aboutir à une organisation d'ampleur limitée créée en février 1958,

se trouvant dans de l'uranium à plus de 95 %, il soit envoyé dans un arsenal pour servir dans une arme, auquel cas il redeviendrait français.

l'Agence Européenne de l'Énergie Nucléaire (E. N. E. A. pour European Nuclear Energy Agency), dont les tâches pacifiques, plus techniques que politiques, allaient se concrétiser surtout par la mise sur pied de trois entreprises communes dans le domaine nucléaire, groupant une douzaine de pays, dont la France. La plus importante de ces entreprises est un réacteur prototype fonctionnant à haute température et refroidi au gaz comprimé; ce réacteur, dit « Dragon », est en construction au centre anglais de Winfrith Heath, son coût sera d'environ quarante millions de dollars. Il représentera la tentative la plus poussée dans la voie des réacteurs refroidis par gaz comprimé que poursuivent les travaux atomiques français et britanniques. La deuxième entreprise « Eurochemic » est une usine commune de traitement de combustibles irradiés, en construction à Mol, en Belgique, coûtant trente millions de dollars; elle est réalisée par un groupe de grandes entreprises chimiques européennes sous le leadership d'une firme française, la seule d'Europe continentale de l'Ouest à avoir déjà construit une telle usine, celle de Marcoule. Le Royaume-Uni ne prend pas part à cette deuxième entreprise, mais participe comme la France à la troisième, la moins importante, dont l'objet est de subvenir aux frais de fonctionnement d'un réacteur norvégien expérimental à eau lourde bouillante.

Ainsi, les années d'euphorie de l'énergie atomique allaient aboutir à l'établissement d'un certain nombre de structures multilatérales internationales, parmi lesquelles les entreprises communes de l'E. N. E. A. et le centre commun de l'Euratom allaient apporter des contributions notables aux problèmes de collaboration posés par le développement à l'échelle mondiale de la technique moderne.

6.

Les années de rajustement.

1958-1961.

La fin de l'année 1958 a vu se dessiner le changement de la conjoncture atomique mondiale; les années qui suivirent furent marquées à la fois par l'aboutissement des projets des années d'euphorie, c'est-à-dire la construction des premières grandes centrales nucléaires et par le ralentissement des programmes ultérieurs, dans l'attente des résultats techniques et économiques de la marche de ces premières unités. Une surproduction de l'uranium, une certaine désaffection de l'industrie et du grand public de plus en plus inquiet des dangers de la radioactivité, ont accompagné ce ralentissement.

Les premières années de fonctionnement des grands organismes atomiques internationaux ne furent pas sans présenter des difficultés, il en a été de même pour la mise en application de la politique des contrôles. Sur le plan militaire, la France, quatrième puissance atomique mondiale, a fait son entrée en 1960 dans le club des nations productrices d'armes atomiques; à cette date, les États-Unis venaient d'atteindre la cadence maximum prévue pour leur production de matières fissiles et d'armes, et accéléraient le rythme de construction de leurs sous-marins nucléaires. Une négociation entre les trois plus grandes puissances sur l'arrêt des explosions expérimentales commencée en 1958 allait échouer en 1961, tandis que les États-Unis commençaient, lentement encore, à revoir leur politique atomique militaire vis-à-vis de leurs alliés.

Les réalisations des grandes puissances.

Pendant ces années de rajustement, les grandes puissances dotées de programmes d'armements atomiques, les États-Unis en tête, ont continué à contribuer le plus au progrès du développement industriel de l'énergie atomique.

Le budget nucléaire américain a été stabilisé aux environs de deux milliards et demi de dollars par an, dont près des quatre cinquièmes étaient consacrés au programme militaire. La construction des réacteurs nucléaires pour la propulsion navale, sous-marine surtout, a été poursuivie avec un succès confirmé et sur une vaste échelle. La première unité marchande américaine, le *Savannah*, navire de vingt mille tonnes, mû par un moteur nucléaire de vingt-deux mille chevaux, prenait la mer pour ses premiers essais au début de l'année 1962. Les tentatives de mise au point d'un moteur nucléaire d'avion se soldaient par contre par un échec; après des dépenses d'un milliard de dollars réparties sur une dizaine d'années, les travaux furent interrompus en raison des difficultés rencontrées, du coût final et du caractère problématique de l'intérêt d'une telle entreprise. Cet abandon a fait, au début de 1961, l'objet d'une des premières décisions du Président Kennedy désireux de donner la priorité aux sous-marins atomiques les plus modernes.

En revanche, un programme d'études et de réalisation de réacteurs nucléaires de propulsion spatiale pour les engins militaires et les fusées interplanétaires a été en même temps considérablement renforcé; la plus grande importance y est attachée. Les premiers essais de réacteurs à très haute température et combustion rapide sont en cours dans le Nevada avec pour objectif un vol spatial d'essai en 1966.

Enfin, plusieurs réacteurs transportables, de près de deux mille kilowatts électriques, pour l'électrification de bases militaires éloignées : Alaska et Groenland, ont été mis en fonctionnement. Ils doivent pouvoir être amenés sur place par avion à partir d'éléments séparés. Ils pourront aussi servir à fournir l'électricité des postes de la ligne de protection de radar du Nord du Canada.

Le programme civil américain a continué à couvrir un large éventail de projets de caractéristiques différentes, le plus grand nombre envisagé par un seul pays. Il est divisé en trois catégories de projets de réacteurs de puissance, les prototypes ou réacteurs de puissance expérimentaux : entièrement construits aux frais de l'U. S. A. E. C.; les réacteurs de puissance de démonstration, construits en collaboration entre l'U. S. A. E. C., l'industrie et les producteurs d'électricité, tous privés; et enfin les réacteurs de puissance privés, construits sans participation gouvernementale directe, mais avec de nombreux avantages financiers tels que des garanties dans le domaine des combustibles nucléaires et un remboursement des frais d'étude.

La politique de l'U. S. A. E. C. favorise d'ailleurs la libre concurrence, en mettant à la disposition de tous les connaissances obtenues par une société privée grâce à des fonds gouvernementaux, la société ne gardant que les spécialistes formés et la pratique réelle du *know-how* obtenu, comme seul avantage, non négligeable d'ailleurs, par rapport à ses concurrents éventuels.

De plus, un effort important a été poursuivi dans la direction de centrales de faible ou moyenne puissance, c'est-à-dire de quelques milliers ou de quelques dizaines de milliers de kilowatts électriques, qui, bien que donnant de l'électricité beaucoup plus chère que les centrales de plusieurs centaines de milliers de kilowatts, sont les seules qui pourraient intéresser les puissances sous-développées.

A la fin de l'année 1961, neuf centrales américaines à uranium enrichi, de plus de cinquante mille kilowatts électriques chacune, étaient en construction ou achevées; leur ensemble représentera au total environ un million de kilowatts électriques installés en 1963, soit moins d'un demi pour cent de la capacité électrique du pays à cette date. La plupart de ces centrales sont modérées et refroidies à l'eau ordinaire, soit pressurisée, soit bouillante. Deux d'entre elles, terminées en 1960, avaient fonctionné en 1961 pendant plus de six mois d'une marche très satisfaisante : celle de Dresden (Illinois) de cent quatre-vingt mille kilowatts électriques à eau bouillante, et celle de Rowe

(Massachusetts) de cent quarante mille kilowatts électriques à eau pressurisée.

A la fin de cette même année 1961, le programme civil anglais était moins avancé, car aucune des sept centrales en construction dans l'ensemble du pays n'était encore en marche. Ces centrales sont du même type que les huit réacteurs construits dans le Cumberland, producteurs de plutonium pour des buts militaires et d'électricité; ces réacteurs à uranium naturel modérés au graphite et refroidis au gaz comprimé fonctionnent avec succès, produisant au total environ trois cent mille kilowatts électriques et quatre cents kilogrammes de plutonium par an. Chacune des centrales civiles dispersées dans le pays comprendra deux réacteurs, les deux premières qui fonctionneront en 1962 auront chacune des réacteurs de cent cinquante mille kilowatts électriques; puis une seule centrale sera mise en marche chacune des années suivantes; la puissance de leurs réacteurs ira en croissant et atteindra pour chacun d'eux quatre cent mille kilowatts pour la huitième centrale, dont la construction a été décidée en 1961 et qui sera achevée vers 1968.

En marge de ce programme anglais se font trois réalisations importantes, un réacteur dit surgénérateur, prototype pour l'éventuelle utilisation du plutonium, construit à Dounray en Écosse, et deux réacteurs, prototypes plus avancés [1] de la filière britannique modérée au graphite et refroidie au gaz comprimé, l'un à moyenne température construit à Windscale, l'autre à plus haute température qui est le réacteur « Dragon », objet d'une entreprise commune européenne.

Les Canadiens ont, pour leur part, continué de se spécialiser dans l'étude des réacteurs à uranium naturel modérés à eau lourde. Ils espèrent que la mise au point économique de cette solution ouvrira de nouveaux débou-

1. Leur rendement énergétique sera amélioré par une température plus élevée des gaz de sortie, grâce à un gainage meilleur à l'acier inoxydable ou au beryllium, qui entraînera toutefois l'usage d'uranium enrichi.

chés à leur production d'uranium. Un avantage de l'eau lourde par rapport au graphite est la possibilité théorique d'obtenir directement plus d'énergie à partir d'une quantité donnée d'uranium; ce facteur rendrait économiquement possible la suppression du retraitement des barres irradiées et ainsi la simplification du problème du rejet des déchets radioactifs par un simple stockage dans le sol des barres usées, dans l'attente d'un éventuel retraitement dans quelques dizaines d'années. Les spécialistes canadiens, et à leur tête Wilfrid Lewis, chef scientifique de l'entreprise, sont convaincus que la solution qu'ils proposent s'avérera la plus économique de toutes celles à l'étude. Ils se trouvent toutefois en opposition avec les techniciens américains partisans de l'utilisation de l'uranium enrichi. Leur désaccord sur l'évaluation du prix du kilowatt est un symbole de l'incertitude qui plane sur l'industrie atomique encore à ses débuts.

Le centre moteur des travaux canadiens reste Chalk River où est entré en fonctionnement en 1958 un deuxième grand réacteur à eau lourde avec une puissance thermique cinq fois supérieure à celle du réacteur qui avait été construit dix ans auparavant. Les Canadiens ont renoncé à extraire le plutonium produit dans les deux réacteurs de Chalk River; ils le vendent aux États-Unis où sont envoyées pour traitement les barres d'uranium irradié.

Une centrale à eau lourde de deux cent mille kilowatts électriques prévue pour 1964 a été mise en construction dans la région des Grands Lacs, un prototype dix fois moins puissant la précède de deux ans. Leur érection est assurée par une collaboration de l'industrie privée et de l'organisme atomique national.

Les données sur le programme soviétique sont pratiquement limitées au seul programme civil; en particulier, la production d'uranium est gardée secrète, car elle donnerait une indication sur l'importance du programme atomique militaire. Toutefois, le ralentissement à partir de 1959 de l'exploitation des mines d'uranium d'Allemagne de l'Est et de Pologne ne semble pas seulement dû à la diminution des réserves des mines exploitées mais aussi au fait que

l'U. R. S. S. a des ressources suffisantes sur son territoire étendu. Une seule mine d'uranium soviétique a été ouverte aux visiteurs étrangers occidentaux; située dans le bassin sidérurgique de Krivoï Rog, elle paraît avoir à elle seule une production annuelle d'environ quinze cents tonnes, soit l'équivalent de la totalité de la production française en 1962.

On ignore combien de centrales militaires à double objectif ont été construites dans la série de six unités, prévues identiques à la première (réacteur plutonigène à uranium naturel-graphite refroidi à l'eau sous pression, produisant cent mille kilowatts électriques) mise en marche en Sibérie en 1958.

Le principal succès nucléaire soviétique original, acquis depuis la seconde Conférence de Genève dans le domaine de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, a été le fonctionnement dès 1959 du premier navire nucléaire de surface, le brise-glace *Lénine*, mû par deux de ses trois moteurs nucléaires de vingt-deux mille chevaux chacun. Au début de l'automne 1961, le *Lénine* a accompli un trajet de près de dix mille kilomètres en un mois, dont les trois quarts à travers un pack polaire épais qu'aucun bateau au monde n'avait osé affronter auparavant. Il a, à la fin de ce voyage, installé, sur des icebergs bordant le pack, seize stations météorologiques radio automatiques qui dériveront par la suite et pourront être continuellement repérées et donner ainsi de précieux renseignements pour la navigation arctique. Celle-ci est si importante pour l'industrialisation en cours de la Sibérie qu'elle entraînera, sans doute, la construction d'autres brise-glaces nucléaires.

Les recherches pacifiques ont été poursuivies sous l'égide d'une organisation spéciale créée sous l'autorité directe du Conseil des ministres et du ministre pour l'Énergie atomique, Vassily Emelyanov, métallurgiste de valeur qui se distingua pendant la guerre dans la construction des tourelles de tank.

Les grands appareils de recherche fondamentale dépendent de cet organisme et en particulier l'accélérateur de particules géant de l'Institut Unifié de Dubna, géré par les onze pays de l'Est. La coordination est efficacement assurée dans ce domaine de la physique nucléaire

par un Institut à Léningrad, responsable de l'étude, de la construction et des perfectionnements de tous les accélérateurs de particules de l'Union Soviétique.

Un grand nombre d'instituts scientifiques soviétiques ont été dotés de réacteurs de recherche, dont certains ont des caractères originaux comme celui du centre d'Obninsk où l'oxyde de plutonium a été utilisé pour la première fois au monde comme combustible nucléaire.

Certains de ces réacteurs, comme ceux de Moscou et d'Obninsk, ont été construits au sein même ou au voisinage proche des agglomérations — les autorités n'ayant sans doute pas eu à craindre des réactions d'inquiétude des populations.

Le programme civil de réacteurs de puissance est essentiellement qualitatif, basé principalement sur l'uranium enrichi; il a été dirigé dans plusieurs voies et est analogue, mais moins diversifié que celui des États-Unis, avec un nombre inférieur de centrales en cours de réalisation. Celles-ci sont au nombre de deux : l'une d'environ deux cent mille kilowatts électriques à eau pressurisée (type Shippingport) est prévue pour une mise en route en 1963 à Voronej ; l'autre, de cent mille kilowatts électriques, avec modérateur graphite et refroidissement par vapeur surchauffée, entrera en fonctionnement quelques mois plus tard dans l'Oural. Initialement, on avait envisagé la construction de quatre réacteurs dans chacun de ces sites.

Une boutade d'un dirigeant de la Commission atomique soviétique : « Toute grande installation nucléaire coûte toujours deux fois plus cher et prend deux fois plus de temps que prévu initialement » montre qu'en U. R. S. S. comme pour les autres grandes puissances atomiques, des difficultés techniques inattendues augmentent bien souvent les délais et les prix de réalisation des grands réacteurs de recherche ou des centrales nucléaires pour lesquels quatre ans sont en général le délai minimum entre la décision de construction au vu de l'avant-projet et la mise en marche.

Sur le plan des relations extérieures, des accords de portée très limitée ont été conclus par l'Union Soviétique de 1959 à 1961 avec les États-Unis, la France et le Royaume-Uni.

Au cours de leur rencontre aux U. S. A. en 1959, les présidents Khrouchtchev et Eisenhower décidèrent de chercher à créer des liens dans le domaine atomique entre leurs deux pays. Par la suite, des missions de techniciens visitèrent les principaux centres de recherches respectifs, et l'on vit avec étonnement en novembre 1959 des physiciens soviétiques à Los Alamos, le sanctuaire des premières études sur la bombe atomique. Un protocole entre les présidents des deux commissions atomiques fut signé à la suite de ces contacts. Sans prévoir de stages, ce protocole envisageait des visites réciproques de quinze jours et une éventuelle action commune dans les domaines de la fusion contrôlée, de la construction d'un accélérateur de particules géant, et enfin du traitement des résidus radioactifs des centrales nucléaires.

Un accord franco-soviétique fut signé en avril 1960 lors de la venue du Président Khrouchtchev en France, il prévoit des échanges de missions de courte durée, mais aussi des échanges de quelques stagiaires dans des domaines de recherche fondamentale. Sa mise en vigueur s'est effectuée très lentement.

Le regain de guerre froide qui a suivi l'échec de la Conférence au sommet de mai 1960 à Paris a nui au développement de ces nouvelles relations dont l'importance est beaucoup plus politique que technique au stade actuel.

L'avènement de la Cinquième République a transformé le caractère du développement atomique français par la décision gouvernementale de donner les priorités et les crédits nécessaires non seulement à l'achèvement rapide de la première bombe, mais encore à un véritable programme d'études et ultérieurement de production d'armes perfectionnées.

Le 13 février 1960 avait lieu à Reggan, dans le sud-ouest du Sahara, l'explosion de la première bombe atomique française. La puissance libérée était de l'ordre de soixante à soixante-dix kilotonnes, soit le triple des premières bombes américaines et anglaises, également au plutonium.

La tâche de la réalisation du premier engin avait

été totalement confiée au C. E. A., au sein duquel fut créée une Direction des Applications militaires; celle-ci dut mettre sur pied, en un temps record, des centres de recherches spéciaux isolés géographiquement et séparés par le secret des autres établissements du C. E. A. C'est dans ces centres que durent être résolus les problèmes délicats de la métallurgie et de la purification extrême du plutonium, les calculs de la masse critique, des questions complexes de physique théorique ainsi que des expériences de physique nucléaire fournissant aux théoriciens les données nécessaires, enfin tous les problèmes et calculs de la balistique de la mise à feu de l'engin avec des précisions de l'ordre du milliardième de seconde.

Par ailleurs, un centre d'essai était créé dans le désert saharien, sous la responsabilité de la Défense nationale et du Commandement interarmées des Armes spéciales, avec un grand luxe d'instruments d'évaluation des essais; le succès de la première explosion démontra l'efficacité de la collaboration du C. E. A. et du ministère des Armées.

Quatre explosions nucléaires aériennes ont été réalisées à Reggan entre février 1960 et avril 1961 [2]; les trois dernières étaient volontairement de beaucoup plus faible puissance que la première. Les conditions de sécurité dans lesquelles ces essais ont été réalisés ont permis de limiter à des doses d'irradiation nettement inférieures aux normes admissibles celles reçues par les rares populations voisines; les protestations des pays riverains africains, dont certains ont été jusqu'à bloquer momentanément les avoirs français ou même rompre leurs relations diplomatiques avec la France, étaient basées sur des considérations purement politiques sans aucun fondement technique.

La prévision de la puissance de chaque dispositif, et par conséquent de ses effets, est possible avec précision, grâce en particulier à l'usage des machines à calculer géantes qui peut-être plus que toutes autres ont facilité les recherches théoriques nécessaires à la réalisation de l'arme.

Six mois après l'explosion de Reggan, le gouvernement

2. Le dernier essai effectué le 25 avril 1961 a clos le programme d'explosions atomiques aériennes françaises en Afrique.

déposait un projet de loi permettant le développement d'un large programme militaire. Cette loi prévoit des autorisations de près de douze milliards de nouveaux francs pour la modernisation de nos forces armées, en particulier par la constitution d'une force de frappe (ou de dissuasion) atomique comprenant à la fois les armes nucléaires et leurs véhicules porteurs, avions supersoniques comme le *Mirage IV* ou missiles. Cinq milliards de nouveaux francs y sont consacrés au programme nucléaire d'études et d'engins spéciaux et comprennent les crédits nécessaires pour assurer le financement de l'usine de séparation isotopique. Les adversaires du projet lui reprochaient à la fois d'être trop coûteux pour les forces du pays et pas assez important du point de vue de la force atomique obtenue. A la suite de l'adoption de la loi en décembre 1960 après des débats difficiles, la France s'est lancée dans le domaine des armes atomiques avec un programme comportant la même série d'étapes que les États-Unis puis le Royaume-Uni avaient dû franchir pour parvenir à la bombe H et à des engins atomiques plus efficaces, moins encombrants et de types variés.

Le programme d'un organisme aussi puissant que le C. E. A. ne pouvait manquer aussi d'être critiqué. Ses détracteurs lui ont reproché de ne pas avoir poussé plus rapidement son programme militaire, en adoptant plus tôt la voie de l'uranium 235 et en construisant des piles plutonigènes fonctionnant à température moins élevée et, par conséquent, moins complexes que les réacteurs à double objectif de Marcoule. Ces critiques oublient qu'en 1952 le C. E. A. n'avait ni les connaissances, ni surtout les moyens financiers pour construire une usine de séparation isotopique de taille minimum; son coût aurait absorbé plusieurs fois la dotation du premier plan quinquennal et son fonctionnement aurait nécessité des centaines de tonnes d'uranium par an dont les mines sur le territoire national n'avaient pas encore été découvertes. C'est au contraire tout à l'honneur des responsables du programme français d'avoir, dès 1952, mis sur pied un développement qui permettait au pays de s'engager dans

la voie militaire, dans l'hypothèse malheureusement confirmée d'une absence de désarmement général, sans négliger pour autant la voie de la production d'électricité d'origine nucléaire. Cette possibilité d'une double utilisation constitue l'avantage essentiel des réacteurs français, compensant les inconvénients pour la production de plutonium d'une marche à plus haute température des piles.

La réalisation des premiers armements atomiques français n'a été rendue possible que par le développement considérable du C. E. A. et la mobilisation de l'industrie française. De 1953 à 1962, en neuf ans, le personnel du C. E. A. s'est accru dans la proportion de un à neuf et a atteint dix-sept mille agents au début de 1962, son budget propre a en 1961 dépassé 2 % du budget de l'État.

A partir de 1958, le centre de Fontenay-aux-Roses établi autour du vieux fort de Châtillon était en plein essor, bien que son abandon en faveur du centre de Saclay ait été envisagé peu d'années auparavant; de grands laboratoires étaient en construction et deux nouveaux réacteurs de recherche y prenaient place en 1959 aux côtés de ZOÉ encore en usage. Un autre réacteur de recherche avait été mis en fonctionnement en 1958 au centre de Grenoble, tandis que plusieurs piles expérimentales de faible puissance, dont l'une au plutonium, ont été ajoutées aux outils déjà installés à Saclay, le plus important des établissements nucléaires français qui, avec plus de cinq mille agents en 1961, a presque dépassé le maximum acceptable pour une bonne gestion; les deux autres centres doivent être limités à mille cinq cents travailleurs.

Enfin, en 1958, il fut décidé de créer un quatrième établissement nucléaire; il a été installé, pour satisfaire aux impératifs gouvernementaux de décentralisation, dans la forêt de Cadarache, au confluent de la Durance et du Verdon, dans les Bouches-du-Rhône; il est destiné aux réacteurs prototypes et d'études prévus au deuxième plan quinquennal.

Au cours de ces mêmes années, le chantier nucléaire de l'Électricité de France, situé à Avoine près de Chinon, était en pleine activité; en fin 1961, la première centrale était presque achevée, la deuxième très avancée, et la troisième au stade de la construction de son caisson en

béton précontraint. L'uranium nécessaire à la marche de ces centrales, comme de celles de Marcoule (dont la troisième, G 3, était entrée en fonctionnement en 1959) est entièrement fourni à partir de la production nationale.

Successivement, trois grandes divisions minières ont été ouvertes par le C. E. A. dans le Limousin, la Vendée et le Forez. Quatre usines de traitement chimique, construites par l'industrie privée, réalisent la concentration du minerai sur place.

La transformation des concentrés en oxyde et métal de haute pureté se fait dans deux usines, celle de Malvesi terminée en 1959, et celle plus ancienne du Bouchet, de capacité moindre. C'est dans cette dernière usine que se traite un riche minerai d'uranium et de thorium de Madagascar, l'uranothorianite, exploitée pour son uranium, et fournissant chaque année comme sous-produit une quantité d'oxyde de thorium de quelque trois cents tonnes, supérieure à toute la consommation mondiale actuelle; celle-ci, consacrée surtout à des usages nucléaires, est répartie à égalité entre la fabrication des manchons de becs de gaz incandescents et celle des alliages utilisés dans la fabrication des avions supersoniques. La production française de thorium est ainsi en grande partie stockée pour une éventuelle utilisation nucléaire dans un avenir lointain.

La prospection de l'uranium effectuée pendant de nombreuses années par le C. E. A. dans la Communauté a abouti, en plus des résultats de Madagascar, à la découverte en décembre 1956 d'un beau gisement à Mounana dans le Gabon. Une usine chimique de traitement du minerai pour la production de concentrés d'uranium y a été construite par l'industrie française; sa mise en marche a été effectuée en 1961.

L'expansion de la recherche nucléaire dans le monde.

A la suite de l'enthousiasme suscité par la levée du secret atomique en 1955, de nombreux pays ont créé des Commissions atomiques, et se sont engagés dans la coûteuse construction d'un établissement nucléaire groupant quelques centaines à un millier de travailleurs autour d'un ou deux réacteurs de recherche, le plus souvent d'origine américaine.

Le but poursuivi est la formation de spécialistes qui pourraient ultérieurement participer à la construction des centrales importées de l'étranger et en assurer ensuite le fonctionnement.

La plupart de ces centres ont été achevés vers les années 1960; il est alors apparu que l'installation d'un réacteur de recherche n'était pas toujours très raisonnable pour les petits pays en voie de développement, pour lesquels la création d'un centre atomique et la possession d'un réacteur représentaient, comme la possession d'une compagnie nationale d'aviation, des instruments de prestige aux dépens du relèvement général de leur niveau scientifique. Il est regrettable que quelques-uns de ces pays n'aient pu arriver à réunir à la fois les techniciens, les crédits et un programme de travail permettant une utilisation efficace de ces coûteux outils de recherche.

De plus, le ralentissement du développement industriel de l'énergie atomique a reculé de plusieurs années le moment où ces mêmes pays pourraient utiliser pratiquement leurs ingénieurs nucléaires, ceux-ci devant être maintenus dans les laboratoires des centres nucléaires nationaux où ils peuvent difficilement apporter de véritables contributions nouvelles aux problèmes industriels, car ceux-ci nécessitent des moyens que seules les grandes puissances possèdent. Ce fait souligne l'intérêt accru du développement de la collaboration internationale sous les formes de recherches et d'entreprises communes analogues à celles organisées par l'Euratom et l'Agence Européenne de l'Énergie Atomique.

En dehors de l'Europe, les pays dont les recherches nucléaires ont atteint un stade important et dont les projets sont les plus ambitieux sont, pour l'Orient et le Moyen-Orient : l'Inde, le Japon, l'Australie et Israël; et pour l'Amérique latine : l'Argentine et le Brésil.

L'Inde est le pays le plus riche du monde en minerais de thorium; il veut rapidement produire une partie de son électricité à partir de réacteurs dits surgénérateurs utilisant le thorium. Ce programme ambitieux est dirigé par le physicien renommé Homi Bhabha, et est réalisé

dans un grand centre nucléaire situé dans la banlieue de Bombay; une grande pile de recherche à eau lourde de quarante mille kilowatts thermiques, réplique de la première grande pile de Chalk River, y a été mise en fonctionnement en 1960; elle avait été construite sous une direction canadienne et grâce à un financement mixte indo-canadien. Cette étape doit être suivie de la construction d'une centrale à uranium naturel comprenant deux réacteurs de cent cinquante mille kilowatts électriques chacun, sans doute à uranium naturel, sur la côte de l'océan Indien, à une centaine de kilomètres au nord de Bombay. Les grandes puissances atomiques occidentales, dont la France, ont fait en 1961 des offres pour cette centrale, dont l'adjudication sera d'autant plus importante qu'elle correspond à la seule compétition internationale en cours en 1961; deux des offres proviennent de l'industrie britannique, très désireuse d'en être chargée.

Le programme japonais est encore plus vaste, car le Japon se trouve être un des pays industrialisés du monde où le prix de l'électricité d'origine conventionnelle est le plus cher, pouvant atteindre dix nouveaux centimes le kilowattheure. De ce fait ses ambitions, révélées par les différents projets en cours, sont très vastes et tendraient à faire du Japon d'ici à 1975 un des plus importants producteurs d'énergie nucléaire. Une Commission rattachée au Premier Ministre est chargée de définir le programme. Les crédits sont importants et voisins de 1 % du budget national. Un premier gisement d'uranium a été trouvé en 1955, il permettrait une production de quelques dizaines de tonnes par an.

Deux réacteurs de recherche ont été installés au centre de Tokai Mura qui occupe plus de mille travailleurs et où se construit un réacteur de recherche à eau lourde et uranium naturel plus important. Le programme de puissance, maintenant ralenti, visait initialement à produire un million de kilowatts électriques installés dès 1966, et trois millions vers 1970. Une société mixte, la Compagnie japonaise de l'Énergie atomique, a été créée pour importer des centrales, en construire, et vendre le courant électrique. Une première centrale anglaise a été commandée, de cent cinquante mille kilowatts; elle sera achevée

à Tokai Mura en 1965; les projets envisagent aussi l'achat d'une centrale américaine. Dans chaque cas, des sécurités spéciales devront être prises en vue d'éventuels tremblements de terre. Le Japon s'intéresse aussi à la propulsion navale marchande.

Israël possède depuis 1960 un petit réacteur de recherche d'origine américaine, mais dans le souci poussé d'élever le niveau scientifique du pays, la Commission israëlienne de l'Énergie atomique est en train de construire à Dimona, dans le désert du Neghev, un réacteur de recherche à eau lourde et uranium naturel semblable au réacteur canado-indien. La révélation de cette construction par la presse anglo-saxonne en décembre 1960 a créé une certaine émotion, en particulier dans les pays arabes; elle provoqua une mise au point du Président Ben Gourion soulignant la destination pacifique de ce réacteur dont il ne prévoyait pas l'achèvement avant trois ou quatre ans.

L'Australie, qui pourrait être dans l'avenir un utilisateur d'énergie nucléaire en raison de l'éloignement de sources conventionnelles d'énergie pour certaines de ses régions, a limité pour l'instant son activité à l'établissement d'un centre de recherches près de Sidney doté d'un réacteur de recherche d'origine anglaise et se spécialise dans l'étude des réacteurs à haute température. Une production d'uranium, supérieure à cinq cents tonnes par an, classe l'Australie parmi les grands producteurs mondiaux.

L'Argentine et le Brésil sont les seuls pays d'Amérique du Sud à faire un effort dans le domaine nucléaire, tous deux ont des ressources en matières de base, minerais d'uranium notables en Argentine, moins abondants au Brésil, mais sables de monazites contenant du thorium en grande quantité au Brésil; des petites installations de traitement de minerais et de production de métal sont en cours de construction ou de fonctionnement, tandis que dans chacun des pays des réacteurs de recherche permettent la formation de spécialistes. Les deux pays s'intéressent à l'installation éventuelle de réacteurs de puissance et le Brésil envisage sérieusement l'achat d'une première centrale à uranium naturel pour laquelle les industries britannique et française se trouveront en concurrence. La stabilité financière et politique du pays

décidera de l'avenir de ce projet brésilien qui ferait suite à celui de la centrale indienne dans la compétition internationale, et serait un facteur important dans la reprise du commerce atomique mondial où la France est prête, grâce à son acquis, à jouer un rôle marquant.

En dehors des pays de l'Euratom, les efforts atomiques les plus notables de l'Europe continentale de l'Ouest sont réalisés en Scandinavie, où les travaux suédois sont les plus avancés. Deux centres, chacun muni de réacteurs de recherche, ont été établis sous l'égide de l'Aktiebolaget Atomenergi, société semi-publique fondée en 1947 dont la majorité des actions appartient au gouvernement qui en assure le financement. Un premier réacteur de puissance de soixante-cinq mille kilowatts thermiques à eau lourde et uranium naturel est en construction près de Stockholm; il est destiné à produire en 1963 à la fois de l'électricité (dix mille kilowatts) et de la vapeur pour le chauffage urbain. La réalisation d'un réacteur plus puissant fait l'objet de discussion entre la Société d'Énergie atomique, l'industrie privée et le Conseil national de l'Énergie, organisme national de production d'électricité. De la bonne mais délicate entente de ces trois organismes dépendra le succès de l'effort industriel suédois qui a pris un bon départ à l'échelle de la recherche.

La Norvège a été le premier petit pays européen à se lancer dans un programme atomique notable sous l'impulsion dynamique du physicien Gunnar Randers. Celui-ci fut l'initiateur de l'accord hollando-norvégien de 1950 qui aboutit à la mise en route en 1951 d'un réacteur de recherche dans l'établissement de Kjeller près d'Oslo, le premier à ouvrir largement ses portes à des travailleurs originaires d'autres pays.

La Norvège étant un pays riche en ressources hydrauliques, son effort atomique s'explique surtout par la présence sur son sol d'une production d'eau lourde et par l'appui des riches armateurs norvégiens intéressés par les éventuelles perspectives d'avenir de la propulsion nucléaire pour leur flotte de commerce d'importance mondiale.

La deuxième étape de l'effort norvégien a été la cons-

truction d'un réacteur à eau lourde bouillante dans la petite ville de Halden au sud du pays, pour la fourniture de vapeur à une usine de pâte à papier voisine. Avant l'achèvement du réacteur en 1959, il fut décidé de l'utiliser plutôt comme un outil expérimental, car la fourniture régulière de vapeur paraissait aléatoire, et c'est alors qu'un financement international fut demandé à l'O. E. C. E. pour assurer le fonctionnement de ce réacteur, objet maintenant d'une entreprise commune européenne.

Le Danemark, berceau de la grande école de physique de Niels Bohr, ne poursuit pas pour l'instant de réalisations industrielles mais a construit un centre de recherches comprenant un bon ensemble de laboratoires équipés de deux réacteurs de recherche, d'origine anglaise et américaine.

L'Autriche, la Finlande et le Portugal sont aussi au stade initial de la création d'un établissement de recherches muni d'un réacteur américain. Le Portugal, producteur de radium avant la guerre, a une industrie d'uranium, la huitième en importance du monde occidental, condamnée malheureusement à péricliter dès 1962 par faute d'acheteur.

L'Espagne a aussi découvert sur son territoire des gisements d'uranium, confirmant ainsi que le Sud-Ouest européen est une des régions uranifères du globe. Une usine de traitement de ces minerais fonctionne depuis 1960 et permettrait l'alimentation en uranium de futures centrales pour lesquelles une capacité d'un million de kilowatts électriques est envisagée pour 1970-1975. L'organisation nationale, la Junta de Energia Nuclear, a monté un centre à Madrid autour d'un réacteur de recherche de conception américaine, de trois mille kilowatts, et où travaillent des techniciens de qualité, formés en partie dans les laboratoires des grandes puissances atomiques.

La Suisse rencontre, de son côté, dans son développement atomique, les mêmes difficultés que celles qui caractérisent le programme allemand : absence d'une organisation centrale puissante et désir de l'industrie privée d'être responsable du programme atomique du pays. Un centre de recherches a été créé près de Zurich par un groupe-

ment d'entreprises privées qui y a construit un grand réacteur de recherche, mais a dû renoncer à subvenir au fonctionnement de ce centre; son financement est maintenant assuré par le gouvernement fédéral et sa gestion confiée à l'École Polytechnique fédérale de Zurich. Les industriels de la Suisse alémanique d'une part, et les industriels de la Suisse romande d'autre part, envisageaient chacun la construction d'un réacteur de vingt mille à trente mille kilowatts électriques, l'un à eau lourde, l'autre à eau bouillante. La décision du gouvernement, en 1960, de ne subventionner qu'une entreprise unique nationale a eu pour heureux effet d'entraîner la fusion des deux groupes qui vont ainsi entreprendre la construction d'un seul réacteur expérimental de puissance.

A la fin de 1961, quatre ans après sa création, la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique, l'Euraton, restait toujours marquée par la disparité entre l'effort français et ceux de ses partenaires dont la politique n'a pas le même souci d'indépendance que celle de la France.

Ni l'Italie ni les Pays-Bas ni l'Allemagne fédérale n'avaient réussi encore à doter leur pays d'organismes atomiques puissants et centralisés à l'échelle nationale; des difficultés créées par l'industrie privée se sont ajoutées en Allemagne à celles résultant de la structure fédérale du pays. La Belgique, en revanche, était mieux équipée avec un organisme central, sans but lucratif, groupant des industries privées mais alimenté par des fonds gouvernementaux.

Le coût élevé de l'électricité en Italie méridionale a entraîné l'industrie de ce pays à se lancer en 1957 dans un ambitieux et relativement coûteux programme d'importations de centrales nucléaires représentant au début de 1962 plus de la moitié des exportations mondiales de centrales en provenance des pays anglo-saxons. Les deux premières centrales, l'une de type anglais, l'autre de type américain, de deux cent mille kilowatts chacune, seront en fonctionnement au cours de 1963 dans la région comprise entre Rome et Naples; la construction de la troisième, de type américain et de puissance analogue, était

juste à ses débuts, à la fin de 1961, dans la région de Turin.

Contrairement aux prévisions, le programme atomique allemand n'a pas suivi l'étonnante expansion industrielle du pays. L'Allemagne fédérale, qui a recouvré sa liberté seulement dans le domaine atomique civil, a eu du mal à mettre en route son effort nucléaire et quand les premiers organismes furent en place, les années d'euphorie venaient de s'achever et le ralentissement atomique mondial allait être une cause supplémentaire de limitation de son activité.

L'Allemagne de l'Ouest n'a pas de commission centralisée pour l'ensemble du pays, mais seulement un ministère fédéral dont les pouvoirs sont limités du fait que certaines attributions en matière nucléaire relèvent encore des États. Le ministre joue toutefois un rôle de coordination par le biais des crédits qu'il distribue et le budget atomique allemand a été pour 1961 égal au cinquième de celui du programme français.

Pour la recherche, deux tendances opposées s'affrontent, l'une favorable à la création de grands établissements nucléaires autonomes, l'autre préférant que la recherche atomique soit répartie entre les universités, les grands instituts de recherches existants et l'industrie privée.

Finalement, deux grands centres sont en cours de développement : ceux de Karlsruhe, au pays de Bade, et de Jülich en Rhénanie du Nord, tandis que des instituts nucléaires fonctionnent auprès des principales universités. Les deux grands centres ont été créés grâce à des initiatives locales et des collaborations complexes entre les États, l'Université et l'industrie, mais ils ont rapidement dû avoir recours à l'aide du ministère fédéral. Tous deux comprennent à la fois des réacteurs de recherche de conception américaine ou anglaise et des réacteurs de construction locale. L'industrie privée étudie plusieurs types originaux de réacteurs de recherche ou de puissance dont le principal, un prototype de réacteur de puissance à haute température, est en construction à Jülich; elle se consacre aussi à l'application de la propulsion nucléaire à la marine marchande notamment en relation avec un groupe d'armateurs de Hambourg.

La Belgique a acheté un réacteur américain de quinze mille kilowatts électriques, initialement prévu pour alimenter en électricité l'exposition de Bruxelles de 1958. Il a été érigé au centre de recherches de Mol, en Campine, et sera achevé en 1962. Ce prototype, en raison de sa puissance relativement faible, sera malheureusement d'un fonctionnement si coûteux que ses seuls frais de marche seront supérieurs aux recettes apportées par la vente de l'électricité. Il sera donc économique de ne pas lui faire produire du courant, et son utilité se limitera à celle d'un banc d'essai technique.

L'industrie belge, sous l'influence en particulier du grand consortium producteur d'uranium, a formé plusieurs groupes actifs qui se sont liés avec l'industrie nucléaire américaine et y ont formé de nombreux techniciens avec l'espoir que partage également l'industrie allemande de devenir un jour des constructeurs sous licence des réacteurs de type américain. Cette politique de pénétration de l'industrie américaine en Europe, qui a reçu un encouragement par la signature de l'accord U. S. A.-Euratom, a eu pour conséquence la création de plusieurs accords coûteux de cession de licences entre les grandes sociétés atomiques américaines et des correspondants appartenant aux différents pays de la petite Europe, dont la France. Ces accords n'avaient eu, avant 1962, qu'une portée limitée, en raison du ralentissement du développement civil.

L'Italie, la Belgique et les Pays-Bas ont tous établi des centres nucléaires dotés chacun de un ou deux bons réacteurs de recherche le plus souvent d'origine américaine, mais de fonctionnement coûteux par rapport au budget de l'effort atomique du pays. Parmi ceux-ci, un réacteur d'essais de matériaux situé au centre belge de Mol est un des plus avancés d'Europe et sera un outil de recherche intéressant pour l'usage duquel le C. E. A. a engagé une collaboration avec l'établissement belge. Le centre italien situé sur le lac Majeur à Ispra était en construction en 1960, au moment où le gouvernement italien décida de le céder à Euratom pour en faire un centre commun de la Communauté européenne, tout en s'engageant à reconstruire un autre centre national.

Enfin les Pays-Bas, malgré leur union atomique déjà ancienne avec la Norvège, sont restés longtemps sans mettre sur pied un véritable programme atomique. L'organisme central, le R. C. N. (Reactor Centrum Nederland), créé en 1955, est une fondation de droit privé à laquelle participent l'État, l'industrie et les compagnies d'électricité qui sont la propriété des provinces. Un centre de recherches est en achèvement à Petten, au bord de la mer du Nord; de plus, des travaux, parmi les plus originaux d'Europe, se poursuivent à Arnhem, dans le laboratoire commun des sociétés provinciales productrices d'électricité. Il s'agit de l'étude d'un réacteur du type homogène (étudié aussi sous un autre aspect aux États-Unis), où le combustible est dispersé dans le modérateur, dans ce cas sous forme de suspension d'oxyde d'uranium dans de l'eau.

Par ailleurs, les projets hollandais envisagent la construction locale d'un réacteur prototype de puissance de conception américaine à eau bouillante d'une cinquantaine de mille kilowatts électriques.

Il est encore trop tôt pour essayer de faire un bilan de l'action d'Euratom après quatre ans de fonctionnement, mais il est évident que le manque d'homogénéité qui ressort d'une comparaison des efforts de ses membres est un facteur considérable de difficulté. Ces difficultés seront sans doute modifiées par la présence éventuelle de nouveaux membres européens; leur entrée dans la Communauté dépendra de celle du Royaume-Uni qui a fait acte de candidature à l'Euratom en mars 1962 sans attendre l'issue de la négociation sur son admission au Marché commun.

Les premières années de l'organisme international ont été consacrées à la mise en place à Bruxelles d'une lourde administration centrale qui groupe quelque cinq cents agents parmi lesquels des techniciens de valeur, mais aussi de trop nombreux juristes, gardiens à la lettre de l'intégrité du Traité. Or, dans un domaine aussi changeant que celui de l'énergie atomique, un traité adopté pendant une période d'optimisme maintenant révolue

devient cinq ans après, si on entend l'appliquer strictement, un corset trop étroit qui risque parfois de créer des difficultés regrettables pour les organismes nationaux à évolution rapide comme le C. E. A. français. De telles difficultés, que les auteurs du Traité n'avaient en général pas prévues, se sont manifestées en particulier dans les domaines de l'approvisionnement et du contrôle; elles nuisent certainement à l'œuvre d'unité européenne recherchée.

Les dispositions du Traité ont beaucoup souffert du changement de conjoncture; en particulier, l'Agence d'Approvisionnement, conçue dans une optique de pénurie, s'est trouvée non seulement peu utile, mais embarrassante. Il en a été de même des contrôles d'utilisation des matières fissiles pour un pays comme la France, qui poursuit un programme militaire.

La Commission, par ailleurs, a cherché quelque peu à prendre vis-à-vis du Conseil des ministres une certaine indépendance au-delà des pouvoirs supranationaux que lui conférait le Traité. En particulier, dans le domaine des relations extérieures, elle a marqué une tendance à vouloir devenir le seul interlocuteur de ses six membres avec l'étranger et elle a été encouragée dans cette attitude par les États-Unis. D'une façon générale, la Commission a parfois cherché à jouer le rôle d'une septième puissance plutôt que de se donner comme tâche de renforcer des liens bi et multilatéraux entre ses membres et l'on a vu, comble du paradoxe, dans quelques cas importants, les six partenaires se consulter pour avoir une attitude commune vis-à-vis de leur propre création : l'Euratom.

Le rôle d'Euratom dans le domaine des réacteurs de puissance s'est d'abord concrétisé par l'accord U. S. A.-Euratom et son relatif insuccès, puis plus récemment et malgré l'opposition de la France, par des études dispersées sur l'application de techniques américaines à la propulsion navale marchande, et par des subventions importantes aux frais de réalisation dans la Communauté de trois centrales de puissance toutes d'origine étrangère. Tout ceci n'a pas contribué à faire progresser des réalisations techniques européennes qui devraient d'ailleurs

s'inspirer des travaux effectués par la France, en raison de son avance.

L'atout principal d'Euratom est le pouvoir qu'il détient de son puissant premier budget quinquennal de recherches, de deux cent quinze millions de dollars; considérable par rapport aux sommes dépensées à l'échelle nationale pour le budget nucléaire des Pays-Bas et aussi de la Belgique et de l'Italie et dans une moindre proportion de l'Allemagne. Il en est résulté une certaine mainmise de l'Euratom sur la recherche nucléaire de ces pays qui y voient un remède aux difficultés retrouvées chaque année pour l'obtention de leurs crédits budgétaires.

Successivement, l'Euratom a pris en charge le centre italien d'Ispra, plusieurs éléments du centre belge de Mol, en particulier le coûteux fonctionnement du réacteur d'essai de matériaux, une partie du centre de Petten aux Pays-Bas et un projet de grand laboratoire d'étude du plutonium au centre allemand de Karlsruhe. Ainsi, au lieu de servir uniquement à créer des activités supplémentaires et des entreprises communes, Euratom a été amené, entre autres, à assurer le fonctionnement d'organismes de recherche existant déjà au sein de la Communauté et de jouer vis-à-vis de ceux-ci un peu le rôle d'une caisse de péréquation; de plus le centre commun de recherches prévu dans le Traité est entaché d'une dispersion géographique aussi considérable que peu souhaitable.

Il n'en reste pas moins que peu à peu un utile brassage de techniciens de différentes nationalités se fera dans ces établissements gérés par Euratom, qui devrait assurer entre tous ses membres la diffusion de toutes les connaissances obtenues grâce aux fonds du budget de recherches. Celui-ci servira aussi à entreprendre des travaux en commun sur quelques objectifs originaux qu'Euratom étudie en propre, comme un réacteur à eau lourde, refroidi par un fluide organique, dit « Orgel », qui sera construit, et réalisé par étapes successives au centre d'Ispra.

La France, pour sa part, a préféré constituer avec Euratom des associations dans des domaines spécifiques qui permettent, par l'apport de techniciens des pays membres et de fonds supplémentaires, de développer dans

un domaine technique déterminé un effort plus grand que celui prévu à l'échelle nationale. Une telle association fonctionne avec succès dans le domaine de la fusion et une autre plus importante va s'appliquer à la technologie des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides, où la France a une avance notable sur ses partenaires.

Ainsi Euratom s'est engagé [3] dans le financement d'un ensemble de recherches, soit au sein de ses propres établissements, soit dans les associations créées pour certains domaines spécifiques, soit dans les contrats conclus avec des laboratoires scientifiques, industriels, publics ou privés. Son avenir dépendra fortement de l'éventuelle admission du Royaume Uni en 1963 et des crédits qui lui seront attribués en 1962 par ses États membres pour son deuxième plan quinquennal de recherches. Si ceux-ci sont suffisants, c'est-à-dire environ le double de ceux du premier plan, et si la Commission délaisse les aspects politiques et juridiques du Traité, ainsi que les tentatives de collaboration avec l'industrie américaine, Euratom, dans les prochaines années, pourra mener à bien sa tâche dans la mesure où il concentrera ses moyens sur un nombre limité de sujets importants, de nature scientifique et technique; dans ces conditions, il apportera à la fois une contribution supplémentaire à l'activité de la Communauté et créera au sein de celle-ci des liens dont l'importance politique sera justement celle que recherchaient les inspirateurs du Traité.

Le ralentissement des programmes industriels.

La mise en marche des premières grandes centrales nucléaires et l'expansion des recherches nucléaires dans le monde ont été accompagnées, à partir de 1959, d'un ralentissement des programmes industriels d'avenir.

Les raisons du ralentissement sont multiples : les unes sont dues à des changements dans le marché mondial des combustibles classiques et à des baisses de prix appréciables de l'électricité d'origine conventionnelle, les autres relèvent de la technologie nucléaire.

La découverte des gisements de pétrole et de gaz du

3. Avec, au début 1962, un personnel de plus de quinze cents agents relevant du seul budget de recherches.

Sahara, la possibilité pour l'Occident de se libérer du besoin du pétrole du Moyen-Orient, la baisse des prix du fret, l'assagissement des producteurs du monde arabe, ont été autant de facteurs qui, en même temps que l'utilisation plus grande du fuel-oil, ont amené une surproduction mondiale de charbon et de pétrole.

Par ailleurs, les rajustements des estimations du coût de l'électricité d'origine nucléaire ont montré que celle-ci allait être, pour les centrales en construction, plus chère que prévue, mais baisserait de prix au fur et à mesure des progrès réalisés et de la construction de centrales plus puissantes. Il avait été prévu en 1955 que ce serait au cours de la période 1960-1965 que les courbes de prix des sources d'énergie d'origines conventionnelle et nucléaire se rencontreraient; il apparut en 1959 que l'énergie nouvelle serait alors encore de 50 % environ plus chère que la classique et que l'écart serait comblé avec un retard d'environ dix ans sur les prédictions initiales.

Le premier programme à subir les conséquences de cette évolution fut le plus ambitieux : celui du Royaume-Uni. Il avait été triplé en 1957 et il fut ramené en 1960 à la cadence initialement décidée en 1955. Trois millions de kilowatts électriques seront installés en 1966, et l'objectif de six millions de kilowatts prévu pour 1965 avec la cadence accélérée ne serait atteint qu'en 1970. De plus, certaines des centrales civiles britanniques devront être aménagées pour pouvoir fonctionner en centrales à double objectif produisant du plutonium militaire dont le prix arbitraire rend difficile l'évaluation du prix de l'électricité fournie.

Le programme soviétique a été modifié dans le même sens en raison des découvertes de sources importantes de pétrole et de gaz naturel faites en U. R. S. S. dans ces dernières années; le programme des centrales purement civiles a été réduit d'abord de moitié, puis du quart ensuite, tandis qu'un accroissement correspondant des centrales à double objectif devait en principe permettre de maintenir le projet d'une production de deux millions de kilowatts électriques en 1965.

En France, la perspective un instant envisagée de doublement du programme de l'Électricité de France

(huit cent cinquante mille kilowatts électriques pour 1965) a été définitivement écartée dès 1960.

Un programme allemand de janvier 1959, qui prévoyait la construction de cinq réacteurs de conception allemande d'une puissance totale de cinq cent mille kilowatts électriques et de deux ou trois réacteurs d'origine étrangère d'un total de trois cent mille à quatre cent mille kilowatts électriques, était encore en discussion trois ans plus tard. La certitude qu'à ce stade le coût de l'électricité d'origine nucléaire est supérieur à celle d'origine conventionnelle n'a pas encouragé les firmes productrices d'électricité à se lancer dans des aventures déficitaires.

Des projets de construction d'une première centrale nucléaire pour la production d'électricité ont été de même repoussés de plusieurs années en Espagne, au Portugal et aux Pays-Bas.

L'accord U. S. A.-Euratom fut mis en vigueur en 1959 au moment même du changement de conjoncture; il devait en subir d'autant plus les conséquences que les sociétés d'électricité européennes étaient rebutées par la complexité des clauses à exécuter, et se rendaient compte alors que les réacteurs américains à eau bouillante et eau pressurisée n'étaient pas encore des « réacteurs éprouvés » comme le laissait entendre l'accord. Pendant deux ans, la seule centrale placée sous l'égide de l'accord a été celle de cent cinquante mille kilowatts électriques déjà commandée en Italie du Sud à la suite du concours de 1958. Puis en 1961, un groupement de sociétés privées de production d'électricité belges a entrepris de réaliser en commun avec l'Électricité de France, à Chooz dans les Ardennes à la frontière franco-belge, une centrale de deux cent quarante mille kilowatts électriques du type américain à eau pressurisée; ce sera la première entreprise nouvelle décidée dans le cadre de l'accord U. S. A.-Euratom. On est encore loin des six ou sept centrales totalisant un million de kilowatts électriques envisagées dans l'accord, et l'objectif du rapport des Sages de quinze millions de kilowatts électriques installés en 1967 paraît absolument démesuré dans la nouvelle optique.

Pour les États-Unis, le ralentissement s'est traduit par le fait qu'aucune décision de construire de nouvelles cen-

trales n'a été prise à partir de 1959. Toutefois, vers la fin de 1961, quelques projets importants étaient en cours d'adoption et l'optimisme commençait à renaître.

Une certaine désaffection s'est manifestée à partir de 1959 au sein de l'industrie privée américaine qui s'était lancée en 1955 avec enthousiasme dans le domaine nucléaire. Seules restent en course en 1961 cinq ou six sociétés géantes qui peuvent se permettre d'avoir des budgets atomiques de l'ordre de dix à vingt millions de dollars par an, en partie ou en totalité subventionnés par la Commission atomique américaine pour certains, budgets supérieurs à l'effort atomique de l'un quelconque des pays de l'Europe de l'Ouest autre que l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni.

Pour l'industrie américaine comme pour l'industrie britannique, la situation des exportations n'était pas très encourageante : en plus d'une quarantaine de réacteurs de recherche en grande majorité américains, cinq centrales seulement de cent cinquante mille à deux cent mille kilowatts électriques chacune ont été commandées à la fin de 1961 — deux du type britannique à uranium naturel (au Japon et en Italie), et trois du type américain à uranium enrichi (deux en Italie et une franco-belge). On est loin du rêve britannique de 1956 de voir l'industrie nucléaire devenir la principale industrie exportatrice du Royaume-Uni. Les cinq grands groupements d'industriels qui s'étaient constitués pour construire les réacteurs anglais et les vendre à l'extérieur ont dû procéder à des fusions les ramenant à trois en 1961 pour pouvoir faire face aux difficultés créées par le faible chiffre de commandes.

En France comme au Royaume-Uni, l'industrie privée, habituée à travailler avec de grands organismes industriels nationalisés, entretient de bonnes relations avec les commissions atomiques, en particulier au Royaume-Uni depuis que les sociétés industrielles ont la responsabilité des constructions du programme d'électrification; celles-ci avaient parfois reproché auparavant à l'Autorité de vouloir trop faire par elle-même.

En revanche, aux États-Unis, les firmes productrices d'électricité restent très opposées à ce que la Commission de l'Énergie Atomique puisse devenir un producteur sérieux d'électricité, tandis que les syndicats cherchent à combattre le monopole des producteurs privés.

Ainsi, le puissant syndicat des travailleurs de l'industrie automobile a cherché en vain à obtenir l'interdiction de l'achèvement de la construction, près de Detroit, de la première grande centrale à neutrons rapides surgénératrice de plutonium (cf. p. 206), sous prétexte de danger pour les populations; la Cour suprême, finalement saisie du différend, a rendu au début de l'été 1961 un jugement en faveur du constructeur privé, d'ailleurs soutenu en l'occurrence par la Commission atomique.

La Commission atomique elle-même n'est pas sans rencontrer des difficultés; en particulier, elle s'est heurtée en 1961 à une violente opposition du Congrès, à l'occasion d'un projet qui l'aurait classée comme producteur d'électricité : il s'agissait d'adjoindre une récupération de sept cent mille kilowatts électriques à un nouveau réacteur géant au graphite, producteur de trois kilogrammes de plutonium par jour, en début d'érection à Hanford. Le Congrès a refusé à l'U. S. A. E. C. le crédit de quatre-vingt-quinze millions de dollars nécessaire à la récupération d'électricité envisagée dans cette centrale qui aurait été la plus puissante du monde.

Cette dispute a avivé la lutte [4] entre les producteurs privés et leurs adversaires qui leur reprochent les bénéfices qu'ils tirent de l'U. S. A. E. C., consistant d'une part, en la fourniture annuelle de vingt millions de tonnes de charbon (10 % de la production nationale) et de six millions de kilowatts électriques pour la marche des trois grandes usines de séparation isotopique, d'autre part en avantages considérables concédés par l'U. S. A. E. C. pour

4. Autre manifestation de cette même lutte : Lewis Strauss, qui présidait l'U. S. A. E. C. au moment de l'affaire Oppenheimer, devait à son tour subir un rude échec politique cinq ans plus tard en 1959, lorsque le Sénat refusa de confirmer sa nomination par le Président Eisenhower au poste de secrétaire d'État au Commerce; ce geste, presque unique dans les annales américaines, était lié à des reproches d'avoir favorisé l'industrie privée lors de l'attribution par l'A. E. C. d'un grand contrat de fourniture d'électricité.

couvrir les risques financiers de construction des premières centrales nucléaires.

La crainte d'une éventuelle nationalisation a même, dans plusieurs pays, amené les producteurs d'électricité à prendre des positions qui ont freiné le développement national de l'énergie nucléaire industrielle. Ainsi en Allemagne comme en Suisse, l'industrie privée a été longtemps hostile à toute aide de l'État, de peur que celle-ci ne puisse être l'amorce de la nationalisation tant redoutée; il a fallu plusieurs années pour que, dans ces deux pays, les industriels acceptent le fait qu'au stade actuel le développement civil de l'énergie atomique est encore une entreprise fortement déficitaire et entraîne l'obligation de subventions importantes.

En Italie, l'industrie électrique, qui comprend aussi des sociétés mixtes, a cherché à jouer un rôle dirigeant dans les recherches atomiques, bien que celles-ci soient presque en totalité subventionnées par l'État; elle a eu, de ce fait, une certaine responsabilité dans le retard jusqu'en fin 1960 du vote de la loi régissant l'énergie nucléaire et créant un organisme national. De son côté, le gouvernement italien, partisan de la nationalisation [5] de la nouvelle forme d'énergie, refusait encore à la fin de 1961 le permis de construire au seul groupe entièrement privé qui souhaitait ériger une centrale nucléaire d'ailleurs commandée depuis deux ans aux U. S. A. et prévue dans la région de Turin.

Ainsi, de multiples causes ont contribué depuis 1959 au ralentissement du développement industriel de l'énergie atomique; il ne faut pas regretter cette nouvelle phase car elle correspond à un sain rajustement; celui-ci va permettre de mieux aborder les difficultés techniques, politiques et psychologiques liées inévitablement au passage à l'échelle mondiale de la nouvelle technique et ainsi la préparation de l'avenir se fera plus calmement que la cadence des années précédentes ne l'aurait permis si elle avait été maintenue.

La pléthore de l'uranium.

Le vaste développement de l'industrie minière et chi-

5. Cette nationalisation fait partie du programme dit « d'ouverture à gauche » adopté depuis 1962 par le Parlement.

mique de l'uranium à partir de 1950 pour alimenter la relance militaire de l'entreprise atomique américaine et les programmes militaires et civils anglais s'est brusquement trouvé à partir de 1960 hors de proportion avec les besoins mondiaux. En cette année, la production du monde occidental avait été de trente-trois mille tonnes d'uranium [6] correspondant en produits finis à un chiffre d'affaires supérieur au milliard de dollars et mettant la production de l'uranium au troisième rang des métaux non ferreux derrière le cuivre et l'aluminium.

Le ralentissement du développement industriel, la politique de contrôle, ne sont pas les principales causes de ce déséquilibre dû surtout à l'abondance des découvertes d'uranium, et en particulier, à la mise au jour de grands gisements uranifères américains postérieurement à la découverte et la mise en exploitation des gisements sud-africains, australiens et canadiens.

La Commission atomique américaine avait favorisé la recherche de l'uranium par les prospecteurs privés, grâce à une généreuse politique de prix d'achats garantis. Dès 1954, certaines régions du Colorado, de l'Utah et du Nouveau-Mexique ont vu se développer une véritable « ruée vers l'uranium » avec la création de villes nouvelles de quelques milliers d'habitants, comme Moab dans l'Utah, où dans la rue centrale se succèdent les drugstores, les études de notaires publics responsables de l'aspect légal des prises de permis, et les marchands d'appareils de prospection minière et de compteurs de radioactivité. Quelques prospecteurs firent des fortunes miraculeuses qui contribuèrent à encourager les recherches auxquelles participèrent avec grand succès les Indiens des réserves, remarquables par leur excellent esprit d'observation; puis les grandes sociétés privées y mirent leurs puissants moyens. Le résultat dépassa les espérances et, dès 1960, les États-

6. Cette production était répartie de la façon suivante : U. S. A. 14 000 tonnes, Canada 12 000 tonnes, Afrique du Sud 4 500 tonnes, Congo belge 1 000 tonnes, France 1 000 tonnes, Australie 700 tonnes. Les États-Unis en ont absorbé près de 80 %, le Royaume-Uni plus de 15 % et la France près de 3 % à partir de ses propres ressources. La production de 1939 était environ quarante fois moins élevée répartie en gros entre le Congo belge pour deux tiers et le Canada pour un tiers.

Unis prenaient au Canada la première place pour la production du monde occidental. La Commission atomique américaine a dû alors suspendre la passation de nouveaux contrats d'achat d'uranium sur le marché intérieur et décider de ne pas renouveler les contrats anciens d'importations.

En effet, le budget militaire américain, si considérable qu'il soit, a ses limites, ainsi que la capacité des usines de transformation d'uranium, et le gouvernement des U. S. A., dans l'obligation de donner la préférence aux producteurs nationaux, a été amené en fin 1959 à décider la non-reconduction des contrats d'achat d'uranium belges, canadiens et sud-africains qui se terminaient respectivement en 1960, 1962 et 1965. Washington, en renonçant au maintien de marchés dont il avait lui-même suscité l'origine, abandonnait un des impératifs de sa politique atomique : la mainmise sur les principales sources d'uranium de l'Occident assurée par l'Agence d'Approvisionnement créée à Québec en 1943, et dont l'utilité disparaissait ainsi en 1960. Cette décision était spécialement grave pour l'industrie canadienne, pour laquelle l'exportation de l'uranium s'élevait à trois cents millions de dollars par an et prenait le troisième rang dans le commerce extérieur du pays après le blé et la pâte à papier. Elle n'a pas été sans effet sur la dévaluation de 1961 du dollar canadien.

Un étalement des livraisons à effectuer suivant les contrats en cours, jusqu'en 1966 pour le Canada et jusqu'en 1970 pour l'Union sud-africaine, doit dans une certaine mesure permettre d'amortir les conséquences économiques de la décision américaine grâce à l'exploitation des mines les plus riches. Mais la production canadienne sera réduite en 1966 au dixième de sa valeur maximum, et la production sud-africaine en 1970 à moins du quart. Dès maintenant, une agglomération de vingt-cinq mille habitants, Blind River dans l'Ontario, fondée pour le développement du principal gisement uranifère, a été réduite à l'état de ville fantôme. De même, l'arrêt en 1962 de la production portugaise relativement faible qui était vendue au Royaume-Uni entraînera du chômage dans une région particulièrement pauvre du pays.

Pour le Congo belge, l'incidence est limitée en raison de l'épuisement quasi total de la mine principale lors de l'arrêt de son exploitation en 1960, à la veille de l'indépendance du pays; à cette date, la mine avait fourni depuis 1944 plus de trente mille tonnes d'uranium aux États-Unis et au Royaume-Uni.

Pour l'Afrique du Sud, le contrecoup est aussi moins grave du fait que l'industrie minière de l'uranium est greffée sur celle de l'or qui va perdre néanmoins une source considérable de bénéfices supplémentaires.

Tandis que les contrats étalés portent encore sur des prix de dix à onze dollars la livre d'oxyde d'uranium, les producteurs canadiens et sud-africains ont cherché en vain, à partir de 1961, des acheteurs au cours de cinq dollars [7] et moins, et il est probable que lors de l'arrêt des contrats étalés, entre 1966 et 1970, les riches mines sud-africaines et canadiennes encore en exploitation, mais totalement amorties, permettront de descendre leur prix de vente encore plus bas jusqu'à des cours respectifs de trois et quatre dollars pour la livre d'oxyde.

Le ralentissement, en attendant l'arrêt probable des achats d'uranium à l'étranger par les États-Unis, est un événement de première importance dans l'évolution de la politique atomique internationale, d'autant plus ressenti par le Canada et l'Afrique du Sud que ces pays avaient fidèlement observé, à la demande du gouvernement américain l'engagement de ne pas vendre à d'autres pays que le Royaume-Uni de l'uranium naturel sans clause de contrôle d'utilisation pacifique. Les producteurs privés sud-africains et canadiens exercent d'ailleurs depuis 1960 une forte pression sur leurs gouvernements respectifs pour obtenir l'abandon de la politique du contrôle à laquelle ils attribuent la responsabilité de la mévente, en partie à tort d'ailleurs, car au stade actuel le seul consommateur véritablement à leur échelle est le pro-

7. Le Royaume-Uni a cherché à obtenir au début de l'année 1962 après une longue négociation avec le gouvernement canadien un prix inférieur à cinq dollars la livre d'oxyde pour une très importante commande de dix mille tonnes d'uranium au sujet de laquelle une lettre d'intention avait été donnée en 1957 au cours de huit dollars.

gramme militaire américain. La clientèle française, beaucoup plus modeste, avait été perdue dès 1957 à la suite de l'échec de la demande française d'achat d'uranium canadien qui avait conduit la France à augmenter sa production nationale d'uranium; celle-ci est devenue excédentaire dès 1960 par suite du manque d'exportations espérées, de l'absence de l'accélération escomptée et même d'un certain ralentissement du programme français d'électrification nucléaire.

L'évolution de la politique de l'aide contrôlée.

Les années qui ont suivi la définition de la politique d'aide contrôlée et la création de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique ont été des années de tâtonnement pour cette politique, dont l'application est restée limitée, mais dont le principe, souvent combattu, n'a jamais été non plus véritablement violé.

Certaines nations soucieuses de leur indépendance, même parfois seulement dans le domaine civil, n'ont pas hésité à créer à partir de 1958 des industries nationales souvent coûteuses pour la production de matériaux nucléaires abondants mais dont les pays anglo-saxons s'efforçaient de contrôler l'utilisation. Ceci est le cas pour les productions françaises, espagnoles et suédoises d'uranium, et pour la production indienne d'eau lourde.

Ni le gouvernement français ni le gouvernement soviétique ne se sont engagés à lier leurs exportations de matériaux et de techniques nucléaires à des contrôles d'utilisation pacifique ou à passer par la voie de l'A. I. E. A.; mais la France, et apparemment l'Union Soviétique, n'ont pas encore été amenées à faire une opération qui puisse être considérée par les Anglo-Saxons comme une rupture de la sorte d'accord tacite par lequel les puissances atomiques avancées évitent de donner à de nouvelles puissances les moyens de fabriquer l'arme atomique.

La politique d'aide atomique internationale suivie par l'Union Soviétique dans le domaine des réacteurs depuis 1955 consiste à vendre aux pays satellites deux types de réacteurs de recherche à uranium enrichi; les uns de deux

mille kilowatts thermiques, les autres de dix mille kilowatts thermiques, ces derniers étant cédés aux pays les plus avancés et peut-être les plus indépendants, comme la Chine et la Yougoslavie. La question de contrôle ne se pose naturellement pas pour les pays situés dans l'orbite directe de l'U. R. S. S. La seule incursion soviétique en matière atomique, en dehors de sa zone de contrôle politique, est la vente à la République Arabe Unie d'un réacteur de recherche du type de deux mille kilowatts mis en route durant l'été 1961. De plus, l'Union Soviétique construit deux réacteurs de puissance, l'un en Allemagne de l'Est, de soixante-dix mégawatts électriques, prévu pour 1963, l'autre moins avancé dans son érection, en Tchécoslovaquie, de cent cinquante mille kilowatts électriques, à eau lourde refroidie au gaz carbonique comprimé.

L'Union Soviétique, s'étant limitée ainsi à des exportations nucléaires vers des pays de son orbite ou politiquement proches, a pu se targuer en la matière de pratiquer la politique de la confiance à l'opposé de la politique de contrôle anglo-saxonne qu'elle applique aussi, mais avec beaucoup plus de discrétion. Elle se présente ainsi comme le champion des pays en voie de développement qu'elle s'efforce de dépeindre comme les éventuelles victimes d'un prétendu colonialisme atomique des grandes puissances atomiques occidentales.

Pour leur part, les États-Unis ont vendu à l'étranger jusqu'en fin 1961 une trentaine de réacteurs de recherche à une vingtaine de nations et cinq réacteurs producteurs d'électricité (les trois centrales mentionnées plus haut, et deux prototypes de faible puissance en Belgique et en Allemagne). Dans l'ensemble, le programme américain d'aide atomique à l'étranger, « atoms for peace », a joué un rôle important dans le développement atomique international, sans toutefois atteindre ni l'amplitude ni la portée politique espérées par ses initiateurs; de plus, même dans ses limites relatives actuelles, il va d'ailleurs à l'encontre de l'autre aspect de la politique atomique américaine, celle du renforcement de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique. En effet, la très grande majorité des pays signataires des accords avec les U. S. A.

préfèrent l'efficacité de la négociation à deux et un contrôle américain relativement souple, à la lourde machinerie internationale et au contrôle d'inspecteurs originaires de pays de l'Ouest comme de l'Est, conséquences d'une aide de l'Agence Internationale.

Les trois centrales nucléaires en construction ou projetées en Italie par les industries américaine et britannique ont été vendues sous condition de contrôle, de même que la centrale exportée au Japon. Pour cette dernière, le Royaume-Uni semble envisager de confier la surveillance de son utilisation à l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, pour l'avenir de laquelle une telle décision serait évidemment d'une grande importance.

En pratique, les États-Unis, ayant le quasi-monopole de la production d'uranium 235 dans le monde occidental, sont assurés du contrôle sur les types de réacteur utilisant ce combustible et dont ils prônent l'exportation pour les centrales de puissance. Par contre, le problème se complique beaucoup pour les centrales à uranium naturel en raison de l'abondance de l'uranium et de l'importance, du point de vue militaire, de leur production de plutonium.

La possibilité pour l'Inde, pays non engagé, de trouver ou non en 1962 un pays, qu'il soit de l'Est ou de l'Ouest, qui lui fournira comme elle le souhaite une grande centrale à uranium naturel sans inspection, sera un cas test de la politique préconisée par les puissances anglo-saxonnes. L'Inde a fait savoir dès 1961 à ses éventuels fournisseurs qu'elle était prête à s'engager par écrit à n'utiliser la centrale et le plutonium produit en son sein que pour des buts pacifiques, mais qu'elle n'accepterait aucune clause de contrôle.

Battue en brèche sur le plan bilatéral, la politique du contrôle a encore moins bien réussi sur le plan multilatéral; en effet, à aucun moment depuis 1958 l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique n'a pu jouer le rôle que lui destinaient ses fondateurs dans le domaine de la répartition et du contrôle des substances fissiles.

A la conférence sur les statuts de l'A. I. E. A., la

France avait fait une mise en garde contre la rigueur du contrôle qui, à son avis, risquait de détourner du nouvel organisme les pays qui voudraient y faire appel pour le démarrage de leur effort atomique en les poussant soit à développer leur propre production de matériaux nucléaires ou à se tourner vers des accords bilatéraux plus favorables. C'est ce qui n'a pas manqué de se produire, d'autant plus que, comme les U. S. A., les autres grandes puissances atomiques, tout en participant à la mise sur pied de l'Agence, ont aussi poursuivi une politique simultanée d'accords bilatéraux.

Bien que les États-Unis aient offert dès 1957 de céder à son prix coûtant de seize dollars le gramme cinq mille kilos d'uranium 235 à l'Agence Internationale au fur et à mesure de ses besoins en vue d'une répartition de matières fissiles, et que les Soviets en aient proposé cinquante kilos et le Royaume-Uni vingt kilos, les seules opérations de l'A. I. E. A. en substance nucléaire ont été, en quatre années, une vente purement symbolique de trois tonnes d'uranium naturel au Japon, soit moins d'un dix millième de la production annuelle du seul monde occidental, et des cessions en cours ou à venir de quelques kilogrammes d'uranium enrichi pour trois petits réacteurs destinés à la recherche et vendus par les U. S. A. à l'Autriche, la Finlande et la Yougoslavie.

L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique n'a donc pas encore rempli la mission pour laquelle elle avait été créée, d'une part prématurément car le démarrage d'une véritable industrie mondiale atomique était moins proche qu'on ne le pensait en 1956, d'autre part tardivement car les États-Unis se sont lancés dans leur politique bilatérale et le marché de l'uranium s'est déréglé avant que le transit par l'A. I. E. A. soit devenu une règle internationale admise.

De ce fait, les nombreuses discussions, au sein de son inefficace et trop large Conseil des gouverneurs, pour préciser les modalités pratiques d'application des statuts relatifs au contrôle, sont devenus des exercices plutôt théoriques auxquels s'opposent les puissances en voie de développement et les pays de l'Est, en particulier l'Union Soviétique.

Malgré son caractère surtout technique, l'A. I. E. A. n'a pu échapper ainsi aux conséquences de la guerre froide; ce fut le cas, en particulier en 1961, lors de la désignation de son deuxième directeur général, Sigvard Eklund, savant suédois que les puissances occidentales proposèrent pour remplacer le premier titulaire de ce poste, Sterling Cole, un administrateur américain. L'Union Soviétique, appuyée par l'Inde, s'opposa vigoureusement à cette nomination qui, à leur avis, aurait dû revenir à un national d'un pays non engagé d'Afrique ou d'Asie.

Devant l'impossibilité où elle s'est trouvée de jouer un rôle effectif dans la surveillance de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, l'A. I. E. A. a été amenée, au cours de ses premières années d'existence, à concentrer ses efforts sur les problèmes d'assistance technique aux pays moins développés, qu'elle conseille par des envois de missions d'experts internationaux; elle participe aux problèmes de formation de spécialistes et a ainsi donné plusieurs centaines de bourses à de futurs techniciens admis dans les centres spécialisés de tous les grands pays atomiques. Elle s'attache à préparer des règlements internationaux concernant les mesures de santé, la protection contre les radiations et la sécurité des réacteurs; elle s'attaque aussi aux problèmes posés par les transports internationaux de matières nucléaires, par la responsabilité civile en matière d'accidents atomiques et enfin par l'évacuation des déchets radioactifs.

Elle participe à la diffusion des connaissances, en particulier en organisant des conférences où les techniciens de l'Est et de l'Ouest viennent échanger des données sur des domaines techniques précis.

Ces tâches, utiles, mais plus effacées que celles prévues initialement, font en réalité de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique un organisme qui joue le rôle d'une annexe technique des Nations Unies dans le domaine atomique, et dont l'utilité et l'avenir dépendront essentiellement de l'amélioration des relations entre l'Est et l'Ouest.

7.

Armes et désarmement atomiques.

Au cours des deux grandes guerres mondiales qui ont marqué du point de vue militaire la première moitié du xxe siècle, les avances dans le domaine des explosifs ont été très réduites, les progrès se sont limités à la taille sans cesse croissante des bombes classiques et aux distances auxquelles elles pouvaient être portées par canons, puis par avions, et enfin par fusées. A la fin de la dernière guerre, l'on avait atteint pour les plus grands avions des bombes d'une puissance maximum de quelques tonnes d'explosif classique.

Les premières bombes atomiques ont représenté un extraordinaire accroissement de près de dix mille sur la puissance d'une bombe, auquel s'ajoutent les effets de la radioactivité. Moins de dix ans plus tard, la bombe H correspondait à un nouveau facteur de mille et à une deuxième révolution dans l'art de la guerre, avant même que les conséquences de la première aient pu être évaluées. Jamais, dans l'histoire de la technique, de telles étapes n'avaient été franchies aussi rapidement. Elles étaient d'ailleurs accompagnées d'un bouleversement non moins considérable dans les moyens de porter la destruction chez l'ennemi à la suite de la mise au point des engins balistiques.

La croissance des stocks des armes nouvelles a été elle-même extrêmement rapide tandis que le nombre de pays qui en possédaient augmentait lentement mais inévitablement, malgré les efforts systématiques de la politique américaine dont les impératifs en matière atomique

ont presque toujours ignoré les principes et l'efficacité de ses propres alliances.

Le grand public est devenu de plus en plus conscient de la possibilité d'une catastrophe qui anéantirait une très grande partie de la civilisation; il suit avec angoisse l'alternance des orages et des éclaircies de la guerre froide et avec scepticisme le manège des négociations du désarmement avec sa succession d'échecs.

Mise au point des armes atomiques.

Tandis que se prenaient les décisions qui allaient engager la France dans la voie de la production de l'arme nucléaire, les trois grandes puissances atomiques mettaient en jeu des moyens considérables pour la mise au point de leurs armes par des séries d'essais prenant fin en novembre 1958 par un moratoire volontaire sur l'arrêt des explosions. Jusqu'à cette date, près de deux cent dix essais avaient eu lieu dont environ cent trente pour les U. S. A., soixante pour l'U. R. S. S. et vingt pour le Royaume-Uni. Le moratoire a duré près de trois ans et n'a été troublé que par les quatre premières explosions françaises; il fut rompu au début septembre 1961 par la reprise des essais soviétiques à la cadence accélérée de près de cinquante explosions en deux mois, entraînant une reprise de près d'une dizaine d'expériences souterraines américaines avant la fin de l'année 1961.

Les États-Unis ont consacré jusqu'en 1962 pour les armements nucléaires près de vingt-cinq milliards de dollars, soit une fois et demie le budget annuel de la France, et dont près des quatre cinquièmes ont été dépensés depuis douze ans à la suite du coup de fouet résultant de la surprise de la première bombe atomique soviétique. Ces dépenses ont été utilisées pour produire à partir de plus d'une centaine de milliers de tonnes d'uranium naturel quelque cinq cents tonnes d'explosifs nucléaires, uranium 235 ou plutonium. Ces cinq cents tonnes d'explosifs nucléaires représentent quelque dix à vingt mille bombes atomiques; celles-ci sont stockées bien entendu sous forme de petites quantités séparées, mais le volume total de leur explosif nucléaire est inférieur au contenu d'un seul wagon de marchandises. Si elle était

intégralement transformée en chaleur puis en électricité, cette quantité de substances fissiles pourrait satisfaire la consommation électrique actuelle de la France pendant quarante ans, ce qui donne une idée de son degré extraordinaire de concentration en énergie.

Aujourd'hui même, du fait du programme militaire américain, les applications de la fission sont au total et encore pour quelques années consommatrices d'énergie à l'échelle mondiale, car les usines américaines de séparation isotopique nécessitent pour leur marche une quantité d'électricité de l'ordre de 2 à 3 % de la production mondiale, beaucoup plus qu'il n'en est produit en 1962 dans les centrales nucléaires fonctionnant pour la production d'électricité.

La Commission atomique américaine est responsable non seulement de la construction des bombes, mais aussi, contrairement à ce qui se passe en France, de leurs essais. Ceux-ci ont lieu aux îles Marshall pour les armes les plus puissantes, et au polygone du Nevada pour les autres. Les Anglais utilisent respectivement les îles Christmas dans le Pacifique et un terrain spécialement aménagé en Australie, tandis que les bombes H soviétiques sont expérimentées en Nouvelle-Zemble dans l'Arctique, et les bombes moins puissantes en Asie centrale. Ces essais ont eu pour but d'obtenir des armes de puissances différentes avec, autant que possible, la meilleure efficacité de la matière fissile mise en jeu; celle-ci est, soit de l'uranium 235 à environ 95 % en concentration, soit du plutonium 239 contenant au maximum quelques pour cent de plutonium 240 [1] (l'isotope nuisible à l'efficacité de l'explosion) et sans doute dans certains cas le mélange des deux.

De 1952 à 1957, environ cinq cents kilogrammes par an d'uranium 235 et de plutonium ont été détruits par fission au cours des explosions expérimentales; cette quantité annuelle a été portée au triple en 1958, l'année où les trois grandes puissances se sont hâtées d'effectuer le plus grand nombre possible d'essais avant de les suspendre.

1. Le barème de rachat du plutonium à l'industrie privée par l'U. S. A. E. C. varie de 45 dollars le gramme pour du plutonium à moins de 2 % en plutonium 240, à 30 dollars le gramme pour plus de 9 % en 240.

Les bombes H les plus puissantes expérimentées par les U. S. A. et l'U. R. S. S. au cours des séries de 1958 avaient sans doute dépassé la vingtaine de mégatonnes de puissance explosive.

Dans cette recherche qualitative, les Américains paraissaient, jusqu'à la fin du moratoire, avoir conservé une avance sur leurs concurrents soviétiques par des progrès multiples qui se sont traduits en particulier par la mise au point des armes tactiques utilisables sur le champ de bataille et par des réductions importantes de l'encombrement, dites miniaturisation de l'engin. Celui-ci est susceptible d'être disposé dans un obus de deux cent quatre-vingts millimètres de diamètre, dans l'ogive d'une fusée *Polaris* tirée d'un sous-marin en plongée, à bord d'un avion de chasse ou dans un engin balistique, et enfin peut-être demain dans un engin nucléaire antimissile.

Dans le domaine de la réduction des effets, les U. S. A. réussissaient en 1958 à faire une bombe équivalente à cent soixante tonnes d'explosif classique, rejoignant ainsi pratiquement l'ordre de grandeur des explosifs conventionnels. Il est probable que le succès obtenu dans cette recherche de la miniaturisation de l'arme atomique a, dans une certaine mesure, nui à la réussite du programme spatial américain dans sa course avec l'Union Soviétique; cette dernière, ayant été obligée, semble-t-il, de concentrer son action sur des fusées susceptibles d'emporter des charges plus volumineuses et lourdes, a pris ainsi l'avance considérable qui allait aboutir à la victoire spectaculaire de la mise en orbite terrestre des premiers cosmonautes.

L'impressionnante série d'essais soviétiques des mois de septembre et d'octobre 1961 a sans doute permis à l'U. R. S. S. de combler, sinon totalement, du moins en grande partie, la marge qui la séparait des États-Unis, à la fois dans la direction des armes puissantes et celle des bombes à effet limité.

Du côté des armes puissantes, la limite atteinte pour une bombe atomique classique semble être la demi-mégatonne; par contre, pour les armes thermonucléaires, le fait que la réaction de fusion n'est pas une réaction en chaîne et, par conséquent, n'est pas soumise à la

limitation de la masse critique, rend théoriquement possible la construction d'armes de puissance illimitée. La bombe de cent mégatonnes avec laquelle le Président Khrouchtchev a menacé le monde pendant l'été 1961, comme la bombe soviétique d'octobre 1961 de soixante mégatonnes, l'arme la plus puissante expérimentée à ce jour, sont certainement à la portée des U. S. A. car elles sont du même ordre de grandeur que celle de quatorze mégatonnes essayée dès 1954 par les Américains à Bikini; elles sont sans doute un peu plus encombrantes.

La réaction de fusion ne donne pas directement de sous-produits radioactifs, mais des neutrons extrêmement énergiques susceptibles de provoquer la fission de l'uranium 238 et des fissions supplémentaires dans une éventuelle enveloppe en uranium; on peut disposer ainsi de bombes à trois zones dites bombes 3 F, fission-fusion-fission, exceptionnellement puissantes et créant des quantités considérables de produits radioactifs. On peut aussi envisager une enveloppe de cobalt donnant lieu, sous l'action des neutrons de fusion, à du radiocobalt émetteur de radiations dangereuses et pénétrantes. Inversement, en l'absence de ces enveloppes d'uranium ou de cobalt, les bombes thermonucléaires provoquent à puissance égale moins de sous-produits radioactifs que les bombes de fission, et par comparaison à celles-ci, l'étrange jargon militaire américain les dit plus propres. Cela a été en particulier le cas de plusieurs des bombes puissantes soviétiques de la série de 1961 dont les retombées radioactives ont été de ce fait moins intenses qu'on ne le craignait d'après la puissance des explosions.

Il n'y a toutefois pas de bombes propres à 100 % car l'amorce de fission est à ce jour indispensable pour démarrer la réaction de fusion, et la bombe H dite à neutrons, sans amorce de fission, n'a pu encore être réalisée.

Un autre facteur doit également être pris en considération : si le tritium qui entre sans doute dans la composition de la plupart des bombes à hydrogène est extraordinairement coûteux et présente de plus l'inconvénient de disparaître de moitié en douze ans, durée de sa période radioactive, par contre les prix du deutérium et du lithium

qui servent aussi dans la bombe à hydrogène sont très inférieurs à ceux du plutonium ou de l'uranium 235 qui déclenchent la fusion, et de ce fait la bombe thermonucléaire, bien que de puissance très supérieure, ne coûte pas beaucoup plus cher que l'engin à fission qui lui sert d'amorce. Ce dernier, s'il est produit en grande série, coûte sans doute moins d'un demi-million de dollars, beaucoup moins que le prix de l'avion ou de la fusée qui pourrait avoir à transporter la bombe. Ainsi, du point de vue économique, les armes nucléaires une fois produites en quantité sont, à destruction égale, des centaines de fois moins coûteuses que les armes conventionnelles.

Une bombe thermonucléaire d'une quinzaine de mégatonnes (qui représente à elle seule une puissance dix fois supérieure à celle de tous les bombardements aériens sur l'Allemagne durant la guerre passée) en explosant à la hauteur optimum de deux mille cinq cents mètres, détruirait tous les bâtiments au niveau du sol sous-jacent sur une surface de deux cents kilomètres carrés, soit à l'intérieur d'une circonférence de huit kilomètres de rayon, les vaporisant, les fondant, les pulvérisant ou les démolissant suivant la distance par rapport à la verticale de l'explosion. Les dégâts importants se prolongeraient à l'intérieur d'une circonférence de quinze kilomètres de rayon, tandis que les dégâts partiels atteindraient trente kilomètres du point zéro. Par temps clair, les effets de brûlure de la peau d'une telle explosion se feraient sentir jusqu'à trente kilomètres et l'irradiation instantanée serait mortelle dans un rayon de trois kilomètres. Si, de plus, une telle bombe comportait une enveloppe d'uranium 238 comme celle de Bikini de mars 1954 et explosait plus près du sol, elle donnerait des retombées mortelles pour toute personne séjournant pendant trente-six heures dans une région en forme d'ellipse, orientée dans la direction du vent, de deux cents kilomètres de long et de cinquante kilomètres de large.

Ce seul exemple suffit à démontrer que la puissance des armes thermonucléaires déjà réalisées depuis près de dix ans est telle que les objectifs les plus visés en cas de guerre, les grandes capitales et leur banlieue, pourraient être anéantis par une seule d'entre elles. De même, il est aisé de concevoir que chaque type d'arme nucléaire dans son

domaine propre (comme par exemple l'arme tactique pour le combat sur le terrain) amènera des bouleversements considérables dans les diverses branches de la stratégie militaire.

La stratégie nucléaire.

Les grandes attaques aériennes de la dernière guerre, de plus d'un millier d'avions de bombardement transportant chacun des bombes de plus en plus puissantes, supposaient à l'arrière une organisation considérable pour la mise sur pied et le fonctionnement de ces véritables armadas de l'air, gouffres de pétrole, de munitions et malheureusement aussi d'hommes. L'arme atomique, au contraire, est une arme de mise en place facile, qui représente une révolution absolue dans l'art de la guerre, tant dans le domaine de la destruction massive des villes, des ports et des centres industriels que dans ses usages tactiques de neutralisation instantanée du personnel et du matériel sur le terrain même. Il a été évalué qu'une bombe de vingt kilotonnes sur un champ de bataille ferait le même effet que le tir de deux mille tonnes d'explosifs en quelques minutes par plusieurs milliers de canons, ce qui est impossible à réaliser. De plus, les bombes à grande puissance peuvent par contamination rendre le terrain inutilisable aux troupes pendant de longues périodes. La mise en jeu d'une certaine dispersion du personnel et des unités serait indispensable pour le champ de bataille de l'avenir.

Mais si l'on peut envisager une utilisation tactique de l'arme atomique doublement réduite en volume et en puissance, elle constitue néanmoins essentiellement une arme de destruction de masse. Elle nécessite, pour être utilisée en tant que force de frappe atomique, que sa production soit accompagnée des moyens de transport les moins vulnérables : c'est-à-dire, les avions supersoniques actuels et futurs, les engins balistiques à moyenne portée et intercontinentaux, les sous-marins nucléaires et, bientôt peut-être, les satellites planétaires.

Les rêves de Jules Verne, les espoirs de 1940 de Joliot et son équipe sont devenus dès 1955 une réalité et le sous-

marin nucléaire, la plus étonnante réussite actuelle de l'emploi de l'uranium en dehors de la bombe, s'impose aujourd'hui comme le complément indispensable de la force atomique d'une grande puissance.

Le tout premier modèle, le *Nautilus*, a réussi, à des vitesses qu'aucun sous-marin conventionnel ne pourrait atteindre, à parcourir une distance équivalente à deux fois et demie le tour de la terre sans ravitaillement en combustible nucléaire et en ne consommant que quatre kilogrammes du précieux uranium 235. Le 3 août 1958, il atteignait le pôle Nord au cours d'un extraordinaire périple de mille cinq cents kilomètres sous la calotte polaire lui permettant de relier le Pacifique à l'Atlantique. Une nouvelle voie de navigation était ainsi inaugurée qui permettrait de couper de près de moitié la distance de navigation maritime du Japon à l'Europe par exemple. Le moteur ne consommant pas d'oxygène, il est facile de renouveler par des moyens chimiques l'air nécessaire à la respiration de l'équipage et, dès 1960, un autre sous-marin nucléaire américain faisait le tour du monde en quatre-vingt-trois jours de plongée ininterrompue.

Dotés de formes nouvelles, ces sous-marins peuvent dépasser la vitesse de trente milles marins à l'heure et plonger à plusieurs centaines de mètres de profondeur. De ce fait, de telles unités sont pratiquement invulnérables et leur chance de survie en cas de conflit atomique est très grande.

Les États-Unis ont rapidement reconnu le caractère révolutionnaire au point de vue stratégique de cette arme nouvelle. Une redoutable flotte de soixante unités sera achevée avant 1965, dont près de la moitié environ était en service à la fin de 1961. Ces sous-marins, dont le coût est compris entre cinquante et cent millions de dollars chacun, sont de deux types : les sous-marins d'attaque de trois à quatre mille tonnes, très rapides et dotés d'instruments ultra-sensibles de détection, et les sous-marins lance-engins de six à huit mille tonnes, susceptibles de lancer en plongée des fusées *Polaris* à carburant solide munies chacune d'une bombe nucléaire; ces engins ont une portée de deux mille cinq cents kilomètres avec une précision de quelques kilomètres malgré le tir en plongée.

De tels sous-marins, porteurs au maximum de seize fusées munies de tête nucléaire, qui peuvent rester des mois en plongée et cachés le long des côtes d'un ennemi éventuel, représentent la plus extraordinaire arme de dissuasion ou de représailles que l'on puisse imaginer; d'où la décision américaine d'en porter le nombre à soixante au lieu de la trentaine prévue initialement.

L'Union Soviétique l'a compris aussi, mais sans doute avec quelque retard, puisque ce n'est qu'en 1961 qu'elle a annoncé qu'elle avait à son tour des sous-marins nucléaires. Le Royaume-Uni en construit deux en relation avec l'industrie américaine.

L'autonomie de ravitaillement et les vitesses obtenues grâce à la propulsion nucléaire ont encouragé la marine américaine à appliquer, malgré l'augmentation de dépense correspondante, ce nouveau mode de propulsion à la flotte de surface et trois unités furent décidées en 1956 et 1957, dont les deux plus grandes, un croiseur de quatorze mille tonnes et un porte-avions de quatre-vingt-six mille tonnes, ont procédé à leurs premiers essais en mer en fin 1961. Le porte-avions l'*Enterprise*, muni de huit réacteurs de trente-cinq mille chevaux qui consommeront quotidiennement trois quarts de kilogramme d'uranium 235, est une des plus grandes constructions mobiles que l'homme ait réalisées à ce jour. L'avenir de la propulsion nucléaire pour les bateaux de guerre de surface reste encore incertain et est lié aux résultats techniques et économiques de la marche des trois navires américains. Mais il est toutefois caractéristique qu'aucune décision définitive n'a été prise récemment aux U. S. A. ou au Royaume-Uni sur la mise en chantier de nouvelles unités dont le coût de construction restera longtemps très supérieur à celui des bateaux de guerre classiques.

Même en l'absence de ce nouveau et extraordinaire progrès que représenterait la propulsion nucléaire spatiale, l'utilisation des engins balistiques à propulsion chimique munis de tête nucléaire transforme totalement la vision de la guerre moderne. Ces fusées susceptibles d'être lancées, soit de bases au sol, soit de sous-marins en plongée,

et demain peut-être de satellites télécommandés, ont des vitesses et des trajets qui les mettent pratiquement hors d'atteinte et il ne faut pas trop espérer de la mise au point, d'ici quelques années, de fusées nucléaires antimissiles qui, en tout état de cause, n'arriveront pas à empêcher la plupart de ces sortes de météorites géantes humaines d'arriver au but.

La guerre presse-bouton ne relève plus de la science-fiction ou des rêves d'audacieux états-majors, son spectre rend déjà démodés les énormes efforts de construction des lignes de radar du Nord du Canada qui devaient prévenir à temps les États-Unis contre une éventuelle attaque de bombardiers en provenance du pôle. De même, les flottes et les ports deviennent trop vulnérables, ainsi que les rassemblements comme ceux mis en jeu dans les débarquements. La stratégie occidentale est de ce fait amenée à subir de profonds bouleversements, en particulier le concept des bases périphériques perd progressivement de son importance.

Les deux grandes puissances atomiques, les U. S. A. et l'U. R. S. S., même si leurs productions d'armes sont encore dans un rapport de deux ou trois à un, ont des stocks tels qu'elles sont chacune capable par une attaque brusquée de mettre l'autre hors de combat, mais sans doute pas avant que celle-ci ait eu le temps à son tour de faire une riposte comparable. De ce fait, la possession de l'arme dite de « dissuasion » joue entre les grandes puissances le rôle d'une épée de Damoclès dont chacune menace l'autre avec peut-être un avantage actuel en faveur de l'U. R. S. S. en raison de son avance dans le domaine des fusées intercontinentales.

A plus forte raison, on peut dire qu'un pays qui est possesseur de la force atomique ne risque pas d'être attaqué par un pays qui en est démuni; ce dernier dépend à son tour beaucoup de la volonté de paix du pays qui détient l'arme. Celle-ci accentue donc le déclassement des petites nations qui ne peuvent plus jouer avec l'efficacité désirable le rôle d'intermédiaire entre les grandes puissances atomiques dont les forces croissent dans ces domaines où elles ne peuvent pas les suivre.

L'arrêt de l'engin balistique porteur d'une bombe

nucléaire étant aujourd'hui presque inconcevable, il n'est d'autre défense que de disperser les centres politiques et urbains, et de les construire en profondeur dans le sol. De ce fait, plus que l'Union Soviétique, les États-Unis sont extrêmement vulnérables avec leurs villes si denses et leurs centres industriels dont un grand nombre sont voisins des côtes et à portée de fusées nucléaires lancées à partir de sous-marins en plongée.

La seule véritable défense passive contre l'arme nouvelle réside dans une dispersion industrielle et urbaine, mais celle-ci paraît au-dessus des moyens financiers et des sacrifices que les U. S. A. ou même l'U. R. S. S. pourraient exiger de leurs nationaux.

En effet, les États-Unis peuvent envisager de reformer la totalité de leur marine et ont pu dépenser pour leur armement atomique plus de vingt milliards de dollars en dix ans, mais ils ont renoncé jusqu'à présent à un effort véritablement efficace de défense passive, évalué par certains à la gigantesque somme de trois cents milliards de dollars en dix ans; l'Union Soviétique, mieux protégée par l'étendue de son territoire et le secret qui couvre son développement industriel et urbain, ne paraît pas non plus avoir abordé la réalisation d'une déconcentration draconienne.

Le problème de la protection civile a brusquement pris l'allure d'une obsession nationale aux États-Unis pendant l'été 1961, à la suite d'un discours du Président Kennedy où celui-ci, à propos de la crise de Berlin, laissait entrevoir un risque de guerre nucléaire avant la fin de l'année et encourageait chaque citoyen à prendre des mesures immédiates pour protéger sa famille. Tandis que le gouvernement américain hésitait encore à se lancer à l'échelle de la nation dans un large mais extraordinairement coûteux programme de construction d'abris collectifs, le grand public s'attaquait au problème des abris individuels comme moyen de protection et de survie contre les retombées radioactives les plus intenses, celles des premières heures et des premiers jours après l'attaque nucléaire.

Un tel abri serait bien entendu inefficace contre les effets directs de choc et de chaleur d'une explosion

nucléaire et, de ce fait, ce sont surtout les habitants des banlieues des grandes villes et même des campagnes qui ont entrepris d'installer dans leurs jardins des constructions rudimentaires munies de provisions et de moyens élémentaires de filtration d'air. L'industrie s'est emparée du problème, devenu rapidement une branche importante de l'économie nationale toujours à la recherche de nouvelles activités. Partisans et adversaires de cette course à l'abri individuel s'affrontent, les premiers, parmi lesquels se situent de grands noms de la science nucléaire, affirment que des dizaines de millions d'individus pourraient être ainsi sauvés; les autres, favorables à un programme national d'abris collectifs, redoutent l'encouragement de l'égoïsme individuel et la fausse impression de sécurité qui pourrait en cas de crise grave peser dans une décision de guerre préventive, la contre-attaque de l'ennemi éventuel n'étant, à tort, plus assez redoutée.

Il est probable que cet emballement, comme c'est en général le cas aux U. S. A. dans de pareilles circonstances, se calmera vite et fera place à un programme gouvernemental limité mais relativement plus efficace; les premiers crédits ont d'ailleurs déjà été votés à cet effet.

De toute façon, il n'est malheureusement pas possible de chercher une assurance dans le précédent de la non-utilisation des gaz toxiques pendant la dernière guerre et il est certain que si une guerre entre puissances atomiques atteint le stade de la destruction en masse, l'on n'aura pas recours à des milliers d'avions de bombardement et à leurs équipages expérimentés quand un seul engin balistique téléguidé à tête nucléaire pourrait réaliser le même effet de destruction. Par contre, il n'est pas impossible que la guerre soit, au début au moins, une guerre limitée sans destructions en masse ni usage d'armes nucléaires, mais même dans ces conditions, la stratégie devrait à chaque instant tenir compte d'une possibilité d'utilisation brusque de l'arme nucléaire par un des adversaires, soit à l'échelle tactique, soit à l'échelle stratégique. L'arme nucléaire a donc dès maintenant révolutionné l'art militaire et si la guerre, contrairement à nos espoirs, devait voir le jour, elle serait, même en l'absence peu probable d'une utilisation de l'arme nou-

velle, totalement différente de la précédente dans ses formes d'organisation et d'opération.

L'arme atomique vide de leur sens toutes les doctrines militaires connues et les chefs des armées ont aujourd'hui du mal à accepter la nouvelle forme de conflit où le courage du combattant, la force des unités et les qualités du chef ne joueront plus le rôle qu'ils ont assumé par le passé.

L'attitude des populations civiles, si conscientes aujourd'hui des dévastations nucléaires possibles, serait un facteur important de la guerre future, une nation entière pouvant être totalement paralysée à la veille même du début d'un conflit par une panique de la population, et en particulier l'exode massif des centres urbains et industriels pourrait transformer le pays en un immense champ de camping dispersé.

Le traitement des rescapés d'une attaque nucléaire poserait des problèmes presque insurmontables, parmi lesquels un des plus angoissants serait la nécessité de pouvoir identifier les individus atteints à échéance d'une dose mortelle de radiation afin de concentrer uniquement les soins sur ceux qui auraient une réelle chance de survie. Enfin, plus imprévisibles encore sont les éventuelles modalités de relèvement du monde après un grand conflit nucléaire. Cette remise en marche dépendrait essentiellement du courage des survivants des pays dévastés et du rôle que joueraient les nations situées dans les régions plus ou moins vastes du globe qui auraient été épargnées et où se trouveraient des universités gardiennes de toutes les connaissances humaines, y compris les données techniques qui auraient rendu possible la catastrophe. La tâche des survivants et des nations peu éprouvées ne se limiterait pas à la reconstruction des ravages, mais comprendrait certainement la mise sur pied d'un gouvernement mondial, des États-Unis du Monde, seule solution qui permettrait d'éviter le renouvellement d'une première catastrophe globale dont aurait été responsable notre système actuel avec l'individualité et l'égoïsme de ses vieilles nations, l'ambition et le nationalisme de ses jeunes pays, l'impuissance de son Organisation des Nations Unies ainsi que la rivalité de ses races et de ses mondes communiste et capitaliste.

Désarmement et propagande antiatomique.

L'histoire du désarmement remonte à l'antiquité, les paix et les trêves de Dieu du XI[e] siècle, les projets de paix perpétuelle du XVIII[e], les congrès de la Paix des années 1848, les conférences de la Paix de la fin du XIX[e] siècle, le pacte Briand-Kellogg de renonciation au recours à la force comme instrument de politique nationale de 1928, les négociations de limitation des armements de la Société des Nations en sont autant d'étapes stériles.

Depuis 1945 et au fur et à mesure des progrès de l'arme atomique, un nouvel aspect du désarmement a fait l'objet de négociations continues : le désarmement nucléaire dont l'histoire à ce jour est celle d'une série de batailles en retraite, d'une longue suite d'impuissantes négociations politiques publiques, où les deux grandes puissances atomiques s'efforcent de gagner la faveur du public et des nations non engagées. Les États-Unis tiennent à des contrôles stricts que l'Union Soviétique refuse, les considérant comme des tentatives d'espionnage pour percer son rideau du secret, un de ses meilleurs moyens de défense contre l'extérieur. De son côté l'Union Soviétique, sans céder sur les contrôles, exige des États-Unis la renonciation à l'emploi de l'arme atomique, base de la force militaire occidentale, et se posant en « champion de la paix », s'efforce de faire du désarmement un tremplin pour sa propagande.

L'échec du plan Baruch avait mis fin à une première phase allant de juin 1946 à mai 1948 où le désarmement atomique avait été traité aux Nations Unies, au sein de la Commission internationale de Contrôle de l'énergie atomique. Pendant cette période, l'Union Soviétique avait constamment demandé que le désarmement atomique soit étudié en même temps que le désarmement conventionnel. Devant l'insuccès des efforts des deux organismes distincts traitant séparément de ces questions, l'Assemblée générale de l'O. N. U. décida, en fin 1950, de mettre à l'étude la fusion des deux Commissions : effectivement, une Commission du Désarmement des Nations Unies, composée des pays membres du Conseil de Sécurité et du Canada, se réunit pour la première fois à Paris au

début de 1952. A partir de 1954, les négociations se poursuivirent au sein d'un Sous-Comité du Désarmement qui comprenait les représentants de cinq pays : le Canada, les États-Unis, la France, le Royaume-Uni et l'Union Soviétique. Cette Sous-Commission s'est réunie cent cinquante-sept fois en trois ans, et ses travaux ont abouti à leur tour à une impasse. Le détail des négociations montre une série de progrès et de reculs, d'espoirs et de déceptions, qui reflètent fidèlement les ralentissements et les accélérations de la guerre froide.

Tandis que l'Union Soviétique continuait au fur et à mesure du déroulement des années à exiger l'interdiction des armes atomiques, l'arrêt des explosions nucléaires expérimentales et, en dernier lieu, l'institution d'un contrôle, les plans des quatre puissances occidentales prévoyaient alors une imbrication du désarmement conventionnel et nucléaire par un système d'étapes successives. Pour chacune, une déclaration des armements et moyens de production devait être suivie d'un contrôle correspondant, à la suite duquel seulement il serait décidé d'un commun accord de passer à l'étape suivante. Les trois stades du désarmement nucléaire devaient être l'arrêt des expériences, l'arrêt des fabrications et enfin la reconversion pour des buts pacifiques des stocks militaires de matières fissiles concentrées.

Dans leur dernière proposition d'août 1957, rejetée par l'Union Soviétique, les puissances occidentales proposaient un engagement de non-utilisation des armes nucléaires, sauf en cas de légitime défense devant une attaque armée. Le plan envisageait, en même temps que la mise en place du contrôle, une utilisation pour des buts pacifiques de toute la production future des matières fissiles ainsi que des transferts en quantités équitables et croissantes, pour des usages non militaires, des matières provenant de la production antérieure.

Inlassable de patience et toujours à la recherche d'un compromis, le représentant permanent de la France aux négociations du désarmement, Jules Moch, insista à partir de 1957 sur l'impossibilité de contrôler la véracité des déclarations de stock d'armes, dont une fraction de plus en plus grande pourrait être cachée au cours des

années, l'ouverture à des inspecteurs des installations de production de matières fissiles ne permettant pas d'en évaluer avec exactitude le débit passé. Jules Moch proposait pendant qu'il en était temps encore de concentrer le contrôle sur les moyens de transport de l'arme, les vecteurs ou fusées balistiques, beaucoup plus volumineux que l'arme elle-même et dont la fabrication était juste en voie de commencement à l'Est comme à l'Ouest.

L'Union Soviétique, pour sa part, cherche à lutter contre l'encerclement des puissances occidentales, exige l'évacuation des bases militaires périphériques et demande la création de zones exemptes d'armements nucléaires. Ce principe est à la base de la proposition faite à la fin de l'année 1957 par le ministre des Affaires étrangères polonais, Adam Rapacki, de créer au centre de l'Europe une zone dénucléarisée où serait interdit tout stockage d'armes atomiques. Cette proposition fut rejetée par les puissances de l'Ouest.

La limitation et l'arrêt des explosions nucléaires expérimentales avaient été envisagés au cours des discussions de 1957 et, à partir de novembre 1958, les trois grandes puissances allaient cesser leurs essais de bombes pendant trente-quatre mois. L'année 1958 voit s'engager deux négociations, l'une sur l'arrêt des explosions nucléaires, l'autre sur la prévention des attaques-surprises qui se solde rapidement par un insuccès.

La Commission du Désarmement, dont les travaux avaient été interrompus à partir de l'automne 1957, reprend ses travaux à partir de mars 1960; la demande soviétique d'une plus large participation des puissances de l'Est a été acceptée et le Comité comprend dix membres parmi lesquels les puissances de l'Est et de l'Ouest étaient pour la première fois représentées à égalité.

A peine trois mois après le début de ces travaux, à la suite de l'affaire du survol de l'Union Soviétique par l'avion américain l'*U-2*, le Comité interrompt ses réunions le jour du dépôt d'un nouveau plan américain de désarmement. Depuis lors, les discussions sur le désarmement aux Nations Unies ont eu lieu à la tribune publique de l'Assemblée générale, ce qui amplifie leur caractère démagogique. Le Président Khrouchtchev en particulier pré-

sente un plan de désarmement général et total à la houleuse session de l'automne 1960.

De novembre 1958 à septembre 1961 s'est déroulée la négociation des trois grandes puissances sur la cessation des explosions nucléaires, les États-Unis et le Royaume-Uni ayant, sans l'accord de la France, accepté de considérer ce problème en dehors des travaux sur le désarmement général; elle devait s'achever à son tour sur un échec marqué par la reprise des essais nucléaires et la décision de l'Union Soviétique (se ralliant ainsi à la thèse française) de ne considérer l'arrêt des expériences que comme un des aspects du plan proposé par le Président Khrouchtchev aux Nations Unies et dont la première étape prévoyait la destruction de toutes les armes atomiques.

En fin septembre 1961, le Président Kennedy et le ministre des Affaires étrangères soviétique présentèrent à nouveau des propositions de désarmement général aux Nations Unies; elles diffèrent par leurs thèmes habituels mais proposent toutes deux un engagement des puissances nucléaires à ne pas transférer d'armes atomiques à des pays qui n'en ont pas et demandent à ceux-ci une renonciation à en fabriquer ou à en acheter aux grandes puissances.

Enfin, en décembre 1961, l'Assemblée générale de l'O. N. U. crée unanimement une nouvelle commission du désarmement de dix-huit membres par l'adjonction au comité précédent de huit pays non engagés. Il faut espérer que, contrairement à la règle générale, l'accroissement du nombre de participants à la négociation en améliorera pour une fois l'efficacité. La France ne l'a pas jugé ainsi et, estimant la négociation sans espoir à ce stade, n'a pas participé en mars 1962 à Genève aux premières réunions de la Commission élargie au sein de laquelle les nouveaux membres vont s'efforcer en vain de trouver des solutions de compromis acceptables par les grandes puissances.

Le grand public a du mal à suivre et à comprendre toutes les subtilités et complexités des nombreux plans de désarmement, mais il assiste depuis quinze ans à leurs faillites successives avec un sentiment d'impuissance crois-

sante. Chaque camp essaie de rejeter sur l'autre la responsabilité des échecs mais l'homme de la rue ne s'y trompe pas; il devine derrière tous les discours l'absence de confiance et de véritable désir de désarmer. Par contre, il est beaucoup plus sensible à la propagande antiatomique qui est menée durant ces mêmes années avec grand succès principalement par le parti communiste.

La création en 1949 du Conseil Mondial des « partisans de la paix » en est un des premiers stades, et à l'annonce américaine de mettre en fabrication la bombe H, ce conseil répondait le 19 mars 1950 par le fameux appel de Stockholm, qui reprend la thèse soviétique de l'interdiction de l'arme atomique et déclare criminel de guerre le gouvernement qui l'utiliserait le premier. Son retentissement a été considérable puisqu'en quelques mois des millions de signatures auraient été recueillies. Un mois auparavant, Einstein avait demandé publiquement au Président Truman de renoncer à l'étude de la bombe H; il écrivait entre autres : « L'empoisonnement de l'atmosphère par la radioactivité, et par suite la destruction de toute vie sur terre, est entré dans le domaine des possibilités techniques. Tout semble s'enchaîner dans cette sinistre marche des événements. Chaque pas apparaît comme la conséquence de celui qui l'a précédé. Au bout de ce chemin se profile de plus en plus distinctement le spectre de l'anéantissement général. »

Des savants interviennent alors de plus en plus contre les recherches atomiques militaires; en 1954, c'est l'association des scientifiques démocratiques du Japon; en 1955, Einstein et le philosophe anglais Bertrand Russell prennent la tête d'un appel au monde, tandis qu'en 1956, la Fédération mondiale des Travailleurs scientifiques, favorable aux thèses soviétiques, publie une brochure sur le danger des explosions expérimentales. En 1957, dix-huit des plus grands savants nucléaires allemands signent à Göttingen un manifeste où ils renoncent à participer à la fabrication, à l'expérimentation et à l'utilisation des armes atomiques (qui leur sont d'ailleurs interdites par le Traité de Paris de 1955). Le parti social-démocrate allemand prend position en faveur de l'appel des savants. Au cours de cette même année, le philanthrope français

Albert Schweitzer fait un appel contre les essais nucléaires et le physicien américain Linus Pauling présente au secrétaire général de l'O. N. U. une pétition, signée par plus de neuf mille scientifiques, demandant l'arrêt des explosions atomiques. Au Royaume-Uni, une fraction minoritaire des syndicats et du parti travailliste est favorable à l'abandon unilatéral anglais des armes atomiques. En 1960 et 1961, des « marches de la paix » entre Londres et le centre militaire d'Aldermaston sont souvent effectuées par quelques milliers de protestataires courageux, inspirés par Lord Russell et insensibles aux intempéries.

Dans le même contexte, un milliardaire américain a organisé en 1957, dans sa propriété de Pugwash, une rencontre privée entre savants de l'Est et de l'Ouest pour discuter des problèmes du désarmement et de la guerre nucléaire, dans l'espoir que la solidarité internationale des scientifiques puisse apporter une contribution à ces problèmes d'importance mondiale. Cette rencontre, jugée utile par les participants, s'est répétée une fois par an aux U. S. A., en Europe et même à Moscou, et cette conférence annuelle, dite de Pugwash, a l'avantage d'être probablement la seule occasion offerte d'une discussion détendue sur les grands problèmes mondiaux et la collaboration scientifique internationale entre des savants influents des pays occidentaux et des pays de l'Est.

L'arrêt des explosions nucléaires.

La propagande sur les dangers pour l'homme des retombées radioactives des explosions nucléaires a contribué à accroître l'inquiétude du grand public vis-à-vis de toute l'industrie nucléaire et risque d'avoir de ce fait une influence nuisible au développement des applications pacifiques de la fission.

La campagne contre les explosions atomiques, souvent inspirée par l'U. R. S. S., s'est prolongée en 1959 par les attaques soviétiques contre les rejets en mer des déchets radioactifs, ces rejets provenant principalement des usines d'extraction de plutonium anglaises ou américaines et à moindre titre françaises. Ici encore il s'agit d'une propagande exagérée qui atteint aussi le grand public. En réalité

ces rejets représentent une radioactivité très faible, comparée à celle provenant des retombées radioactives des explosions nucléaires dans tous les océans du globe, dont l'Union Soviétique est aussi en partie responsable.

Il est toutefois certain et extrêmement troublant que, pour la première fois dans l'histoire de la technique, les conséquences d'une action humaine ont eu un effet rapidement mesurable et durable à l'échelle du globe tout entier; les quelque deux cent cinquante explosions atomiques aériennes qui ont eu lieu depuis 1945 jusqu'en 1962 ont augmenté la radioactivité de l'air que l'on respire et des aliments que l'on consomme. Ce fait est suffisamment impressionnant en lui-même pour expliquer que le public, en butte aux exagérations de la propagande et parfois des charlatans, soit prêt à accuser la bombe atomique de tous ses maux et en particulier de toutes les anomalies du temps et de toutes les catastrophes naturelles.

Le technicien cherche à convaincre de l'inexactitude de ces interprétations et devient suspect à son tour quand il ne peut pas véritablement démontrer ses affirmations autrement que par l'assertion qu'une explosion atomique, toute puissante qu'elle soit, ne représente qu'une pointe d'épingle par rapport aux immenses forces qui régissent les phénomènes de l'atmosphère à l'échelle mondiale.

Une explosion atomique aérienne donne lieu à trois sortes de retombées radioactives : la plus importante est celle de matériaux relativement lourds dans un voisinage de quelques dizaines de kilomètres du point d'impact, puis celle des poussières qui sont projetées à dix ou douze mille mètres d'altitude dans la troposphère et enfin celle des poussières les plus fines qui sont projetées encore plus haut dans la stratosphère.

L'absence de nuages aux très hautes altitudes permet à ces dernières particules de se déployer tout autour du globe et de ne retomber que très lentement sur la terre en plusieurs années. Par contre, le nuage de particules radioactives situé dans la troposphère se disperse en tournant en sens inverse du mouvement de la terre et ses particules retombent en quelques semaines en divers points du globe, entraînées par des chutes de pluie ou de neige.

L'évaluation exacte des conséquences pour l'homme des accroissements de radioactivité du milieu ambiant est un problème aussi important que difficile. Les Nations Unies s'en sont emparées et décidèrent de créer en décembre 1955 le Comité scientifique pour l'étude des effets des radiations ionisantes, dont le rapport de 1958 est une utile documentation sur la radioactivité ambiante, sur les retombées radioactives et les effets des radiations sur l'être humain et son milieu. Il a permis de souligner que l'irradiation subie, du fait des explosions nucléaires passées, ne représente qu'un faible pourcentage de l'irradiation à laquelle l'humanité a toujours été soumise en raison des radiations naturelles et, plus récemment dans son évolution, à la suite des utilisations médicales des rayonnements pénétrants.

Le public a néanmoins du mal à se satisfaire des données techniques qui lui montrent, dans le cadre des explosions expérimentales effectuées, le peu d'importance du danger actuellement créé, et est en général prêt à accepter toutes les hypothèses les plus pessimistes.

L'on peut dire, pour justifier les exagérations, que l'on ne dépeindra jamais assez les horreurs d'une guerre atomique et que la crainte suscitée par celle-ci est un des meilleurs moyens de l'empêcher. Cependant le technicien se doit de donner une vue raisonnable des choses. Il peut ainsi dire qu'une guerre où aurait lieu l'explosion de toutes les bombes à hydrogène stockées à ce jour dans les deux camps ferait des ravages indescriptibles dans ce que nous appelons la civilisation, qui ne s'en relèverait sans doute pas. Mais la radioactivité créée dans l'atmosphère serait encore quelques milliers de fois inférieure à celle qui pourrait supprimer toute vie à la surface du globe.

C'est dans ces conditions que fut abordé à partir de 1958 le problème politique de l'arrêt des explosions nucléaires, à la fois sous la pression du public de plus en plus inquiet des retombées radioactives et en raison d'un désir commun des trois puissances militaires de ne pas voir s'augmenter le nombre de pays possédant l'arme atomique. La négociation fut précédée en juillet et août 1958 d'une Conférence technique sur les moyens de déceler une explosion

atomique. Cette Conférence, qui mit en présence les experts des quatre principales puissances occidentales (U. S. A., Royaume-Uni, Canada et France) et de quatre puissances de l'Est (U. R. S. S., Pologne, Roumanie, Tchécoslovaquie), a été un des très rares succès de la série des négociations de désarmement depuis la guerre.

Les experts se mirent d'accord sur les divers systèmes de détection possibles. En particulier, le repérage puis l'analyse des produits de fission radioactifs présents dans le nuage projeté dans la troposphère par une explosion aérienne permet d'avoir en plus de l'indication de l'explosion une très bonne connaissance des constituants de la bombe, de son rendement et de sa date. Seule une série d'explosions très rapprochées (comme la série soviétique de l'automne 1961) donne lieu à des mélanges de nuages qui en rendent l'analyse individuelle presque impossible. D'autres systèmes de détection sont basés : sur les ondes acoustiques qui se forment lors des explosions aériennes et sous-marines; sur les oscillations sismiques qui interviennent lors d'explosions voisines du sol, sous terre ou sous l'eau; sur les ondes radio-électriques et sur les radiations optiques qui se produisent lors des explosions dans l'atmosphère. Une explosion nocturne par une nuit claire donne une si éclatante lueur que celle-ci peut être décelée par observation de la lune dont la partie obscure est brièvement illuminée par réflexion.

Les conclusions des experts leur permirent de définir un système de détection mondiale fondé sur la création de quelque cent quatre-vingts postes capables d'identifier toutes les explosions ayant lieu dans l'atmosphère et la grande majorité des explosions souterraines d'une puissance supérieure à cinq kilotonnes.

A partir de novembre 1958, à la suite de la série d'explosions puissantes de l'automne 1958, les trois puissances atomiques militaires s'attaquèrent à la mise sur pied d'un traité international de suspension des essais dont les signataires renonceraient non seulement aux explosions nucléaires, mais aussi à aider d'autres puissances à procéder à de tels essais.

La Conférence politique de Genève prit un bon départ, donnant l'impression que les U. S. A. et l'U. R. S. S.

tenaient à la faire aboutir; les principaux articles du traité furent adoptés, et l'on décida même du siège à Vienne de la future organisation de contrôle; de celle-ci relèveraient plus de cinq mille personnes, chacune des cent quatre-vingts stations de contrôle devant avoir un personnel de trente techniciens. Son financement serait de l'ordre de cinquante millions de dollars par an.

Le choix de Vienne pour le siège de la nouvelle organisation présentait l'avantage du voisinage de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique. En effet, dans l'hypothèse d'un arrêt des explosions nucléaires, les variations de la radioactivité ambiante seraient uniquement dues aux conséquences du développement pacifique de l'énergie atomique. Dans ces conditions, les mesures de radioactivité indispensables à la surveillance internationale des installations civiles serviraient en même temps au contrôle du respect de l'accord de cessation des explosions nucléaires et l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique pourrait ainsi jouer un rôle important dans la mise sur pied et le maintien d'un tel réseau de mesures internationales de la radioactivité ambiante.

Mais à partir de 1960, la négociation se ralentit, car l'on se heurtait une fois de plus au problème du contrôle et de l'inspection, en particulier pour la détection des explosions souterraines, en raison de la difficulté de distinguer entre une explosion souterraine de faible puissance et une petite secousse sismique. Cette nouvelle complication soulevée par les Américains résultait d'observations sur des explosions classiques réalisées après la conférence technique de 1958.

Les Américains paraissaient désireux d'obtenir une garantie certaine d'observation du Traité, le désaccord avec l'Union Soviétique se situant autour de la composition de la Commission de contrôle, du droit de veto sur le budget, du nombre de postes de contrôle fixes à installer en Union Soviétique, du nombre d'inspections sur le terrain à faire dans le cas d'événements sismiques douteux, du droit de veto relatif à ces inspections et de la composition des équipes d'inspecteurs.

La négociation fut interrompue en décembre 1960 après plus de deux cent cinquante séances en raison de l'élection présidentielle américaine.

Entre-temps, les Nations Unies s'étaient saisies d'un autre aspect du problème en cherchant à s'opposer aux expériences nucléaires françaises et l'Assemblée générale votait en décembre 1959, à la majorité des deux tiers, une résolution demandant à la France de ne pas procéder à ses explosions nucléaires au Sahara. Nos expériences de Reggan furent l'objet d'une hostilité croissante de la part des pays africains, bien que le site dans le désert fût convenablement choisi pour garantir la protection des populations voisines contre les principales retombées radioactives locales faisant immédiatement suite à l'explosion et que leurs toxicités radioactives fussent insignifiantes pour le monde par rapport aux expériences américaines et soviétiques de 1958 et à la série soviétique de 1961. Les passions anticolonialistes des pays afro-asiatiques sont un des éléments de base de cette opposition farouche à nos essais car, pour ces pays, l'arme atomique est encore le monopole de l'homme blanc, qui ne l'a utilisée que contre l'homme de couleur.

A la suite de son élection, le Président Kennedy décida la reprise des négociations, qu'il voulait voir aboutir malgré une hostilité croissante du Pentagone et de certains membres de la Commission atomique américaine; dans son esprit, la signature d'un accord devait constituer un test de la bonne volonté soviétique en vue d'une détente internationale.

Dès la reprise des conversations au printemps 1961, il devint manifeste que l'Union Soviétique ne paraissait plus intéressée à conclure un accord, soulevant toutes sortes de difficultés nouvelles, malgré des concessions américaines sur le nombre des inspections. Renonçant à une clause déjà acceptée, elle exigeait la « troïka », direction tripartite de l'organisme de contrôle (Est, Ouest, et neutre) et accusait les U. S. A. de chercher à utiliser l'inspection envisagée comme moyen d'espionnage; elle attaquait enfin la France pour ses essais nucléaires en prétendant, ce qui ne manque pas d'humour, qu'ils servaient aux États-Unis et au Royaume-Uni, qui ainsi violeraient le moratoire d'arrêt des expériences, maintenu depuis 1958.

La France n'avait d'ailleurs pas caché qu'elle ne se sentirait en aucune façon liée par la conclusion entre les

trois grandes puissances d'un accord sur l'arrêt des essais, n'ayant pas pris part à cette négociation qu'elle ne considérait pas comme une véritable mesure de désarmement, en raison de l'accroissement continu des stocks d'armes de ces mêmes trois puissances dont les fabrications se poursuivaient.

Il est difficile d'expliquer clairement le raidissement soviétique accompagné d'une recrudescence de la guerre froide. Il est certain que la Chine a dû faire une pression sur son principal allié pour s'opposer à la conclusion de l'accord, et ceci d'autant plus énergiquement qu'elle s'approche du moment où elle disposera également de l'arme atomique.

De plus, l'Union Soviétique avait certainement techniquement plus à gagner que les U. S. A. à une reprise des expériences, mais l'on pouvait croire qu'elle attendrait le moment où le gouvernement américain ne pourrait plus résister aux pressions intérieures puissantes favorables à la cessation du moratoire et reprendrait ses essais; cela lui aurait permis d'en faire autant, tout en mettant les U. S. A. en accusation devant l'opinion mondiale. Il n'en a rien été, et à la veille de la trois cent trente-neuvième réunion à Genève, c'est l'Union Soviétique qui a rompu la trêve et commencé une série d'expériences aériennes le 1er septembre 1961, bravant ainsi l'opposition des pays non engagés, du Japon, principal adversaire de toute explosion nucléaire, et de toute l'opinion mondiale. Il est impossible d'évaluer exactement les raisons de cette décision, où sont intervenus sans aucun doute à la fois le facteur chinois, une forte pression des militaires et enfin le désir de frapper les esprits en paraissant indifférent à l'opinion mondiale au moment de la crise de Berlin et à la veille d'une réunion à Belgrade des pays non engagés. Ceux-ci se sont d'ailleurs abstenus de condamner l'Union Soviétique à la grande déception des États-Unis qui en ont tenu rigueur à la Yougoslavie en particulier.

Les déclarations soviétiques relatives à la reprise des essais, manifestement préparés depuis de nombreux mois, affirment d'ailleurs que ceux-ci sont effectués dans le seul intérêt de la paix puisqu'ils renforcent la puis-

sance de l'Union Soviétique et de ses alliés devant les menaces croissantes de la remilitarisation de l'Allemagne de l'Ouest.

La décision soviétique allait donner aux États-Unis l'occasion d'un succès politique en leur permettant de retourner contre l'U. R. S. S. l'accusation portée tant de fois contre eux, de souiller l'atmosphère du globe. Appuyés par le Royaume-Uni, ils l'utilisèrent habilement pendant quelques jours en demandant à la Russie soviétique de mettre fin aux explosions aériennes; mais, devant le refus de celle-ci, les Américains allaient, deux semaines après leurs adversaires, reprendre leurs essais, mais cette fois par des expériences souterraines dont la radioactivité reste contenue dans le sol et qui ne donnent pas lieu à des retombées radioactives. Neuf expériences souterraines ont été effectuées avant la fin de l'année 1961, dont l'une, dans une formation géologique saline, était destinée à des fins pacifiques et a eu lieu en présence de représentants étrangers.

C'est ainsi que le traité sur l'arrêt des expériences nucléaires a perdu au stade actuel toute chance d'être conclu. Il faut le regretter, car il aurait, malgré son insuffisance, représenté une importante mesure de détente internationale, du fait même de la mise en vigueur pour la première fois d'un contrôle mondial en matière nucléaire. Il n'aurait cependant pas été une véritable étape de désarmement.

En effet, la conclusion de ce traité aurait été une action relevant plus du tranquillisant que du médicament car, destiné à rendre plus difficile l'accès du Club atomique à d'autres pays, il ne s'oppose nullement à l'accroissement des stocks de substances fissiles des grandes puissances nucléaires. Il aurait amené une détente momentanée qui n'aurait pas même réussi à limiter le nombre des membres du Club atomique, s'il n'avait pas été suivi, comme le demandait la France, de l'arrêt contrôlé des fabrications d'armes et d'une conversion des stocks existants, sans doute par cession à un organisme international qui en vérifierait l'utilisation pacifique ultérieure.

Si le traité avait été conclu et appliqué sous la forme qu'il avait pratiquement atteinte au début de l'année 1960,

il aurait permis pour la première fois de mettre en place un contrôle international, peut-être imparfait, mais à l'échelle mondiale, l'Union Soviétique ayant accepté à ce stade les clauses comprenant l'installation d'un certain nombre de postes d'inspection sur son territoire. On peut se demander si le gouvernement américain n'a pas été alors trop exigeant dans ses demandes sur l'efficacité du contrôle des faibles explosions souterraines; mais à la lueur des événements qui suivirent la recrudescence de la guerre froide, on peut douter aussi que l'Union Soviétique ait vraiment eu le désir d'arriver à un accord.

A la suite de la reprise des explosions nucléaires soviétiques, puis américaines, les deux derniers mois de l'année 1961 ont été marqués par une suite de propositions ou d'initiatives qui donnent quelque peu l'impression d'incohérence d'une machine déréglée, qui s'emballe et tourne à vide.

Ainsi les Nations Unies adoptèrent successivement une résolution demandant un moratoire des essais nucléaires (malgré l'opposition des puissances atomiques militaires), un projet demandant de considérer le continent africain comme une zone interdite aux armements nucléaires (malgré l'abstention de la France et de nombreux États africains), une résolution reprenant la thèse soviétique de mise hors la loi des armes nucléaires (malgré l'opposition des principales puissances occidentales) et enfin une résolution visant à la création d'un club non atomique, c'est-à-dire de pays qui, actuellement dépourvus d'armes nucléaires, accepteraient de renoncer à en fabriquer ou à en recevoir en dépôt d'autres pays.

Fin novembre 1961, les négociations de Genève sur l'arrêt des explosions nucléaires furent reprises sur une proposition anglo-américaine, acceptée par l'Union Soviétique sans doute saturée pour plusieurs mois par les résultats de sa longue série d'essais, et qui néanmoins posa comme condition la renonciation à toute explosion expérimentale par les puissances occidentales, dont la France. Dès la réouverture des négociations, l'U. R. S. S. proposa la conclusion immédiate d'un accord interdisant les essais nucléaires et demanda que la France vienne participer aux négociations. Peu de jours après, elle

rejetait comme base d'un futur traité tout le travail effectué depuis trois ans, s'opposant à toute mesure de contrôle international. La Conférence a été ajournée *sine die* le 29 janvier 1962 au terme de sa trois cent cinquante-troisième séance après avoir abouti à une impasse totale qui va entraîner les U. S. A. et le Royaume-Uni à considérer la reprise, sans doute conjointe, des explosions nucléaires aériennes envisagées pour le printemps 1962 sur le polygone britannique des îles Christmas dans le Pacifique.

La course aux armements nucléaires n'a donc nullement ralenti, et l'humanité va être amenée à vivre des années dangereuses tant que les grandes puissances n'auront pas accepté de se défaire volontairement et complètement de leurs stocks d'explosifs atomiques. Une véritable tranquillité internationale dans ce domaine (et sans doute dans tous les autres) ne verra le jour qu'avec la création d'un gouvernement mondial ou d'une autorité supranationale atomique, à qui toutes les puissances sans exception délégueraient leur souveraineté nationale dans le domaine de l'utilisation de l'énergie atomique.

L'insuffisante collaboration nucléaire de l'Alliance Atlantique.

Malgré les échecs successifs des négociations sur le désarmement nucléaire et sur l'arrêt des explosions expérimentales, le gouvernement américain a éprouvé la plus grande réticence à assouplir vis-à-vis de ses propres alliés son étrange politique qui classe l'arme fondamentale de la guerre future comme un domaine spécial hors collaboration.

Dès 1946, la loi Mac-Mahon avait mis fin à l'alliance militaire atomique anglo-saxonne et deux ans plus tard le gouvernement américain avait obtenu du Royaume-Uni qu'il renonçât à son droit de veto sur l'utilisation des armes atomiques américaines résultant de l'accord de Québec.

Cinq ans après la mise en vigueur du Traité de l'Atlantique Nord et à la suite de l'explosion de la première bombe H soviétique, la loi Mac-Mahon subit en 1954 une première modification, ouvrant la possibilité à une action

américaine internationale très limitée dans le domaine militaire : le Président des États-Unis peut autoriser la communication, à des pays alliés, des renseignements nécessaires à l'élaboration de leurs plans de défense, à la formation du personnel capable d'utiliser des armes atomiques ou de se défendre contre celles-ci, enfin à l'évaluation de la puissance atomique militaire d'un ennemi potentiel. Cet amendement précise qu'est absolument interdit le transfert de tout renseignement relatif à la constitution ou la fabrication de la bombe, sauf ses caractéristiques externes, y compris sa taille, sa forme et son poids, ainsi que son rendement, ses effets et les moyens de la faire parvenir au but.

Quatre ans plus tard, en 1958, à la suite de l'émotion provoquée par le *Spoutnik* soviétique, la loi Mac-Mahon fut à nouveau amendée sous l'angle de la collaboration militaire internationale. Cette deuxième modification ouvrait enfin la voie à de véritables alliances nucléaires, car elle permet au Président d'autoriser le transfert à des pays alliés d'éléments non nucléaires d'armes atomiques ainsi que des connaissances secrètes et des combustibles nucléaires se rapportant aux sous-marins atomiques et aux réacteurs transportables, mais elle rend aussi possible la cession de données secrètes et des substances nécessaires aux armes elles-mêmes. Cette dernière possibilité est limitée par la condition expresse que le pays bénéficiaire ait déjà fait des progrès substantiels dans le domaine de l'armement nucléaire.

Cette restriction relative aux « progrès substantiels » s'applique en 1958 au seul Royaume-Uni, car au cours des discussions qui ont abouti à l'adoption de la loi il a été précisé par le Comité de l'Énergie Atomique du Congrès qu'en aucune façon les amendements proposés ne doivent encourager une quatrième nation à devenir une puissance atomique. Le Comité précise que, pour être considérée comme ayant accompli des progrès substantiels, une nation doit disposer de beaucoup plus que la connaissance purement théorique des armes atomiques et avoir effectué plus qu'un nombre limité d'essais d'armes atomiques. Cette nation doit être capable de fabriquer une variété d'armes atomiques, de faire fonctionner les

établissements, laboratoires et usines, nécessaires à cet effet; elle doit aussi disposer d'un centre d'essai ».

Ces nouvelles dispositions avaient pour but de coopérer d'une part avec le Royaume-Uni dans le domaine des armes atomiques, d'autre part avec les alliés de l'O. T. A. N. qui souhaiteraient avoir des sous-marins atomiques à la suite d'une proposition non ambiguë faite par le Président Eisenhower lui-même lors de la réunion des chefs de gouvernement de l'O. T. A. N. en décembre 1957. De plus, la législation nouvelle, tout en continuant à ne pas autoriser le transfert d'armes atomiques à un pays allié, permet ce transfert en territoire étranger à la condition que le gouvernement américain conserve la garde, le contrôle et la propriété de la partie nucléaire.

A la suite de ces décisions, le Royaume-Uni signa en 1958 et 1959 une série d'accords lui donnant à nouveau, après treize ans d'interruption, le statut d'allié nucléaire avec accès aux secrets militaires et aux matériaux américains, en même temps que la cession d'un moteur pour un premier sous-marin atomique prévu pour 1963, prototype d'une série qui sera ensuite construite par l'industrie britannique sous licence américaine.

L'accord prévoit en particulier le transfert, des États-Unis au Royaume-Uni, de quantités déterminées d'uranium 235 (dont la production est limitée et le prix de revient plus élevé en Grande-Bretagne), en échange de plutonium produit dans les réacteurs britanniques à uranium naturel.

Le Canada de son côté a passé un accord militaire lui donnant accès aux informations secrètes concernant les réacteurs utilisables à des fins militaires, et la possibilité de recevoir de tels appareillages des U. S. A. ainsi que les matières fissiles nécessaires à leur fonctionnement; ces réacteurs devant être utilisés pour alimenter en électricité le réseau de radars dans le grand Nord du Canada.

Enfin, le Canada, l'Allemagne fédérale, les Pays-Bas, la Turquie et la Grèce et d'autres puissances de l'O. T. A. N. ont signé des accords autorisant le transfert sous l'autorité américaine des parties non nucléaires de systèmes d'armes atomiques, ainsi que la communication d'informations

permettant l'entraînement des personnels nationaux au maniement des armes atomiques américaines entreposées sur leurs territoires, sans que soit donnée aucune connaissance sur la nature des armes elles-mêmes.

Un accord semblable avec la France a été ratifié par le Congrès américain en septembre 1961, pendant la crise de Berlin, pour permettre aux forces françaises en Allemagne d'utiliser avec les armes et les engins dont elles disposent les charges atomiques américaines qui, en cas de conflit, leur seraient remises conformément aux règles de l'O. T. A. N.

La France a été néanmoins pour sa part beaucoup moins favorisée que le Royaume-Uni, car le Congrès américain s'est opposé à toute cession de connaissances secrètes, rendant ainsi impossible un accord sur le moteur nucléaire du sous-marin; l'avance très probable des U. S. A. sur l'U. R. S. S. dans ce domaine a été émise comme prétexte bien que celui-ci apparaisse d'autant moins justifiable vis-à-vis de la France que les principales affaires d'espionnage atomique ont eu une origine britannique.

En revanche, un accord militaire de 1959 met à la disposition de la France quatre cent quarante kilos d'uranium 235 américain très concentré pour alimenter un prototype de moteur de sous-marin qui va être réalisé dans les années à venir et construit avec les seuls connaissances et moyens français.

Cette méfiance à l'égard de la France, même en matière de sous-marin atomique, malgré les offres formelles du Président des États-Unis, n'augure pas d'un changement favorable rapide du Congrès dans le domaine encore plus sensible des armes atomiques, bien qu'il puisse cependant, déjà, s'il le voulait, modifier sa position en raison des progrès substantiels réalisés à la suite des premières explosions expérimentales françaises de 1960 et 1961.

Il est certain que la collaboration entre les principaux alliés de l'O. T. A. N. se ressent de la doctrine américaine qui, douze ans encore après la première explosion soviétique, leur refuse individuellement des connaissances et des armes depuis longtemps en la possession du rival soviétique. Elle entraîne la France à entreprendre

un effort considérable de duplication regrettable, spécialement pour l'usine de séparation isotopique nucléaire, le sous-marin et la mise sur pied des armes atomiques et à hydrogène.

L'échec de la négociation avec l'Union Soviétique sur la cessation des explosions nucléaires et la recrudescence de la guerre froide devraient, semble-t-il, amener le Congrès à revoir prochainement sa position vis-à-vis de la France et avant le prochain coup de théâtre politique mondial — sans doute celui de la bombe atomique chinoise.

Il faut toutefois reconnaître que, depuis 1954, la tendance a lentement évolué, mais toujours dans le même sens d'une révision progressive de la politique atomique internationale américaine en matière de défense atomique, au fur et à mesure qu'est réduite la durée du trajet d'éventuels engins nucléaires ennemis et que s'accroît le risque possible d'un Pearl Harbor atomique.

Le temps matériel nécessaire pour mettre en place la tête nucléaire dans une ogive d'engin balistique amènera forcément à confier aux Alliés non pas seulement la partie non nucléaire de l'arme, mais l'ensemble monté de celle-ci, quitte à trouver une formule de double contrôle rapide permettant à la fois au pays à qui est confiée l'arme et au gouvernement américain de participer conjointement à l'éventuelle décision d'emploi. Ce sont précisément les difficultés soulevées par cette question de la décision d'emploi d'armes nucléaires américaines, qui pourraient être stockées sur le sol français, qui a été la cause de l'opposition du gouvernement français à un tel stockage. Par contre, l'administration et le Congrès américain ont envisagé en 1961 la possibilité de collaborer avec l'O. T. A. N. en la dotant d'armes nucléaires dont l'emploi n'eût pas été exclusivement sous contrôle américain.

Il en résulte que la politique américaine nucléaire militaire est certainement destinée à évoluer dans l'avenir de façon à enfin mettre sur pied avec ses alliés un système collectif et une stratégie d'ensemble à la hauteur de la complexité des problèmes nouveaux qui se posent du fait de la révolution que l'arme nouvelle apporte, non seulement dans la conduite de la guerre, mais aussi dans les relations entre nations.

8.

Le développement industriel et le problème des radiations.

Près de quarante ans se sont écoulés entre les débuts de l'aviation et l'établissement de lignes aériennes commerciales régulières au-dessus de l'Atlantique, bien que, dès la découverte de l'aviation, les problèmes techniques à résoudre aient été clairement posés, mais ces problèmes portaient en eux des difficultés considérables qu'il fallut surmonter. Il en est de même pour l'utilisation pacifique de l'énergie atomique; il faudra une trentaine d'années au moins entre la découverte de la fission en 1939 et le début d'une véritable industrialisation à l'échelle mondiale des centrales nucléaires. Comme pour l'aviation, les prototypes, souvent largement financés par les programmes militaires, demandent des années d'études et nécessitent des crédits atteignant des centaines de millions de nouveaux francs; une menace constante est aussi toujours présente : celle des dangers pour l'homme de la radioactivité qui, comme la gravité pour l'avion, guette la fausse manœuvre; comme pour l'aviation enfin, le problème des matériaux est capital.

La technologie nucléaire est dominée par les problèmes liés aux effets des rayonnements intenses produits au sein d'une pile atomique en marche ou à la suite de son fonctionnement. Le comportement des matériaux nucléaires sous radiation, les techniques des manipulations à distance, le traitement des déchets radioactifs, la protection du personnel des centres nucléaires, et enfin la délicate psychologie du grand public sont autant de problèmes cruciaux dont la solution va conditionner le développement des applications industrielles de la découverte de la

fission de l'uranium, parallèlement à l'extraordinaire expansion de l'utilisation bienfaitrice des radioéléments artificiels produits dans les piles atomiques.

Les problèmes techniques des centrales de puissance.

Le problème essentiel des centrales de puissance est la récupération, avec le meilleur rendement possible, de la chaleur produite par le fonctionnement du réacteur; ce rendement est d'autant plus grand que la température de marche est plus élevée, mais en même temps les problèmes de tenue des matériaux deviennent plus difficiles à résoudre.

En pratique, le combustible peut être, sous forme de métal, d'alliage ou d'oxyde, de l'uranium naturel, de l'uranium enrichi en uranium 235 ou enfin de l'uranium 235 presque pur. Le modérateur est en général, soit du graphite, soit de l'eau ordinaire ou lourde. Le fluide de refroidissement peut être un gaz, une vapeur, un liquide ou même un métal fondu; il entraîne en dehors de la pile les calories produites par la fission pour actionner directement, ou le plus souvent par l'intermédiaire de vapeur d'eau, un turbo-alternateur.

Il existe au stade actuel du développement deux grandes familles de réacteurs de puissance, celle basée sur le refroidissement au gaz carbonique sous pression (en général à uranium naturel), celle basée sur le refroidissement à eau sous pression ou bouillante (en général à uranium enrichi). Il existe de plus une catégorie exceptionnelle de réacteurs, en cours d'étude dans les grands pays et destinés sans doute à jouer un rôle important dans l'avenir : il s'agit des réacteurs dits surgénérateurs (*breeder* en anglais) de matière fissile dont la possibilité fut d'abord démontrée en 1953 aux États-Unis avec le réacteur d'Arco où s'était faite la première production d'électricité.

Dans certaines conditions, l'excès de neutrons disponibles dans une pile peut entraîner la formation de plus de matières fissiles qu'il n'en est consumé pour produire ces neutrons. Cette surgénération de matière fissile peut se faire, soit par transmutation d'uranium 238 en plutonium, soit par transmutation de thorium en ura-

nium 233 (isotope non naturel de période cent soixante mille ans) lui aussi susceptible de subir la fission sous l'action des neutrons.

Si ces processus possibles théoriquement [1] pouvaient être mis en pratique, l'uranium 238 d'une part, et le thorium d'autre part, pourraient de proche en proche être transmutés en plutonium ou en uranium 233 et jouer le rôle de véritables combustibles potentiels. Les réacteurs les plus favorables à la surgénération du plutonium sont des réacteurs spéciaux, à cœur en combustible très enrichi et sans modérateur, c'est-à-dire à neutrons rapides beaucoup moins absorbés par les matériaux de structure et susceptibles de former plus facilement du plutonium dans un manteau d'uranium 238 disposé autour du cœur.

Du succès de l'économie des réacteurs surgénérateurs dépendra la fraction de l'uranium, ou même du thorium, qui pourra sur le plan pratique être transformée en énergie utilisable. Ce problème est capital dans l'évaluation des réserves d'énergie du globe, mais ne présente pas d'urgence au stade actuel du développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire en raison de l'abondance de l'uranium et de l'uranium enrichi aujourd'hui disponibles.

Quel que soit le type du réacteur, l'extraction de la chaleur dégagée ne peut se faire par refroidissement direct du combustible nucléaire, qu'il soit sous forme de métal ou d'oxyde d'uranium, car ces substances sont peu résistantes aux agents chimiques et sont attaquées par le gaz carbonique et l'eau à des températures peu élevées. On est donc amené à les protéger par un gainage dont l'existence est de plus indispensable pour empêcher les produits de fission formés à la surface du combustible d'être entraînés dans la pile et ses circuits annexes qu'ils souilleraient.

Le problème du gainage des combustibles nucléaires

1. La surgénération est théoriquement possible parce que chaque fission donne en moyenne de deux à trois neutrons; comme l'un de ceux-ci est indispensable pour le maintien de la réaction en chaîne, il y a en pratique surgénération si les autres neutrons sont disponibles pour transmuter plus d'un atome d'U-238 ou de thorium respectivement en plutonium ou U-233.

est un des plus délicats de cette nouvelle technologie. Le métal de gainage doit : résister à la corrosion du fluide de refroidissement, tenir à haute température, rester en contact intime avec l'uranium métal ou son oxyde suivant le cas et ne pas donner lieu avec eux à la formation d'alliages, absorber peu les neutrons et, enfin, permettre une protection totale avec de faibles épaisseurs.

L'acier inoxydable est malheureusement trop absorbant pour les neutrons; il peut être utilisé pour le gainage de l'uranium enrichi, mais ne peut l'être pour l'uranium naturel. Seuls l'aluminium et le magnésium, parmi les métaux courants, peuvent servir à gainer l'uranium naturel, mais leurs températures d'utilisation sont limitées.

Des températures plus élevées sont possibles avec de nouveaux métaux, le béryllium et le zirconium, tous deux extraits des minerais de pierres semi-précieuses, le béryl et le zircon, et dont l'étude et la préparation industrielles sont poussées en rapport avec le développement de l'énergie atomique, en France en particulier. Le zirconium résiste spécialement à l'eau et à sa vapeur; son utilisation nucléaire a été mise au point pour le gainage des éléments de combustible du moteur du premier sous-marin nucléaire américain; tandis que le béryllium métal, extrêmement léger et faible absorbeur de neutrons, semble avoir un très grand avenir, mais il n'a pas encore pu être produit avec des propriétés métallurgiques satisfaisantes et son prix de revient est encore très élevé du fait de sa haute toxicité et de la nécessité de protéger le personnel qui le manipule contre les effets nocifs, analogues à des tuberculoses accélérées provoquées par son inhalation sous forme de poussières.

Les problèmes de tenue des matériaux ne se limitent pas aux effets classiques de la température, il s'y ajoute un nouveau phénomène, celui de l'action des rayonnements.

En effet, même des corps simples, comme le graphite ou les métaux, subissent sous l'action des radiations des bouleversements de structure qui nuisent à leur tenue mécanique et à leurs propriétés physiques. Cette action est due au déplacement des atomes dans les structures cristallisées sous l'effet d'irradiations neutroniques poussées.

Le graphite, soumis à l'action d'un flux de neutrons

intense, change de propriétés mécaniques et de dimensions; des contraintes s'y produisent ainsi que des accumulations d'énergie qu'il faut éliminer, car à la longue elles peuvent devenir dangereuses. Cette élimination se fait par recuit du graphite, c'est-à-dire de la pile, les atomes revenant en place avec libération de l'énergie emmagasinée. C'est au cours d'une de ces opérations de réchauffage d'une des piles anglaises de Windscale que celle-ci prit feu et répandit sur la région avoisinante des produits de fission dangereux.

L'uranium métal se déforme à la fois sous l'action de la température, des rayonnements, et des produits de fission gazeux qui s'accumulent en son sein. Ces déformations sont d'autant moins marquées que le grain métallique est plus petit, ce qui est le cas pour les alliages d'uranium à faibles teneurs d'impuretés (aluminium, molybdène ou chrome) qui résistent beaucoup mieux à ces effets; il en est de même des céramiques d'oxyde d'uranium. D'autres métaux, comme le béryllium, deviennent cassants et fragiles sous l'effet d'irradiations intenses.

Parallèlement au développement d'une nouvelle technologie industrielle, celle de la fabrication des combustibles nucléaires, toute une science appliquée des effets physico-chimiques des rayonnements sur la matière est en voie de création. Sa connaissance est indispensable à la construction des réacteurs de puissance dont l'économie est évidemment liée à une longue vie des matériaux, et en particulier des éléments qui constituent les combustibles nucléaires des piles. Ces études nécessitent l'emploi de réacteurs de recherche à haut flux pour essais de matériaux; elles sont compliquées, dans le cas des combustibles nucléaires irradiés, par la radioactivité qu'ils manifestent après leur séjour dans la pile qui implique pour leur étude l'usage de laboratoires spéciaux, dits de haute activité, comportant des dispositifs de protection du personnel contre les radiations.

Les problèmes de métallurgie spéciale ne se limitent pas au cœur actif du réacteur, car celui-ci est souvent enfermé dans une enceinte d'acier apte à supporter des pressions élevées. La fabrication même de ces caissons de grande dimension est un problème délicat; les dif-

ficultés rencontrées dans la tenue après soudure de tôles d'acier de dix centimètres d'épaisseur ont provoqué un retard très important dans la mise en marche de la première centrale nucléaire de l'Électricité de France E. D. F. 1. La technique des caissons en béton précontraint, inaugurée avec succès en France à Marcoule, permettra à l'avenir d'éluder ce problème propre aux très grands réacteurs; elle est déjà adoptée, par les Anglais comme par les Français, pour leur plus puissante centrale à venir.

Le fluide de refroidissement étant normalement le seul élément mobile à l'intérieur d'un réacteur en marche, l'unique bruit qui accompagne le fonctionnement est celui des moteurs de circulation du fluide véhiculant l'énergie thermique.

Le contrôle de la pile se fait en déplaçant des barres d'alliages, comme l'acier au bore, qui absorbent les neutrons et influent sur la réaction en chaîne; des barres analogues, dites de sécurité, peuvent arrêter automatiquement la pile en cas d'accident. L'ensemble est contrôlé électroniquement, de même que la radioactivité du fluide de refroidissement de chaque élément de combustible, de façon à déceler en marche toute rupture de gaine et pouvoir retirer les éléments défectueux avant que le circuit d'extraction de chaleur puisse être sérieusement souillé par des produits radioactifs.

Parmi les autres organes délicats des réacteurs se trouve le dispositif de sortie des barres irradiées, spécialement compliqué si le retrait du combustible doit pouvoir être fait la pile continuant à fonctionner. Les barres sont retirées dans d'imposants et épais récipients cylindriques de plomb appelés « cercueils ».

Une très brève description de deux centrales de type différent donnera une idée de la complexité de ces nouvelles conquêtes de la technologie moderne.

Le réacteur E. D. F. 2, en construction à Chinon, comprendra : un ensemble cylindrique vertical de graphite pesant trois mille tonnes, haut de sept mètres, ayant douze mètres de diamètre, où se trouvent plusieurs milliers de cavités verticales dans lesquelles sont logées des

cartouches d'uranium métal (deux cent cinquante tonnes), cylindres creux de quelques centimètres de diamètre, gainés d'un tube de magnésium portant extérieurement des ailettes. L'ensemble, refroidi par du gaz carbonique comprimé à vingt-cinq atmosphères, dont la température s'élèvera à trois cent cinquante degrés centigrades, est situé dans un caisson sphérique d'acier de dix-huit mètres de diamètre. Cette sphère, à son tour, est logée dans un véritable blockhaus de béton de trois mètres d'épaisseur en moyenne qui protège les opérateurs contre les rayonnements sortant de la pile à partir du jour où elle a été mise en marche. Le gaz comprimé cède sa chaleur, dans des échangeurs de température, à de l'eau qui se vaporise et actionne deux turbo-alternateurs qui produisent l'électricité. La chaleur produite au sein du réacteur sera voisine de huit cent mille kilowatts, près de 30 % de celle-ci sera transformée en électricité dont une fraction servira à alimenter les compresseurs et les pompes de circulation du gaz. En tout, un rendement net de 25 % est espéré, la centrale devant produire deux cent mille kilowatts électriques.

La construction d'une centrale de ce type demande quatre ans et son coût total est évalué à environ quatre cents millions de nouveaux francs. On espère pouvoir y laisser l'uranium en place jusqu'à ce que trois dixièmes pour cent de celui-ci environ aient subi la fission.

La centrale nucléaire la plus puissante des États-Unis au début de l'année 1962, celle de Dresden dans l'Illinois, a été mise en marche en 1960 avec une puissance de cent quatre-vingt mille kilowatts électriques. Elle est à eau bouillante et uranium enrichi; le cœur du réacteur est un cylindre de trois mètres de hauteur et de diamètre et les éléments de combustible sont faits de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi à une teneur de un et demi pour cent en uranium 235 logées dans d'étroits cylindres de zirconium groupés en faisceaux. Le tout est situé dans un caisson cylindrique de dix mètres de haut protégé extérieurement par une épaisseur de trois mètres de béton. Le réacteur est modéré par de l'eau bouillante qui, en circulant le long des barres d'uranium, donne de la vapeur à deux cent quatre-vingts degrés centigrades

susceptible d'actionner directement une turbine. Pour plus de précautions, l'ensemble du réacteur et de ses circuits annexes est enfermé dans une sphère en acier de soixante mètres de diamètre en légère dépression, de façon à éviter que des poussières ou des gaz radioactifs puissent s'échapper dans la campagne environnante en cas d'accident.

Ces descriptions incomplètes ne donnent qu'une idée superficielle des deux principaux prototypes de centrales nucléaires qui caractérisent la première génération de celles-ci; elles s'avéreront sûrement aussi différentes des centrales de 1980 que les premiers avions commerciaux l'étaient des long-courriers actuels.

L'évolution des centrales nucléaires est liée au facteur capital de la tenue des éléments de combustible et de l'incidence de leur coût sur le prix du kilowatt-heure électrique produit. L'évolution actuelle semble être en faveur de l'utilisation de l'oxyde d'uranium plutôt que du métal, et de l'uranium légèrement enrichi.

Beaucoup plus coûteuse en investissements qu'une centrale thermique classique, une centrale nucléaire peut encore coûter aujourd'hui environ mille cinq cents nouveaux francs par kilowatt électrique installé. Le cœur nucléaire de tels réacteurs ne représente qu'une fraction de leur prix de revient global et les quantités d'acier et de béton mises en œuvre interviennent pour une large part dans l'établissement du prix de ces appareillages. L'électronique absorbe aussi une fraction non négligeable des dépenses. Le risque d'un accident, qui ne saurait être explosif, mais pourrait néanmoins entraîner des projections de matières radioactives dans le voisinage de la centrale, est souvent couvert par la construction, autour du réacteur et des circuits radio-actifs, de larges cloches de protection en acier dont le coût se répercute encore sur celui de l'électricité produite.

Malgré de telles précautions, l'accident théoriquement maximum, dont la probabilité de réalisation est tout à fait infime, pourrait provoquer des dégâts considérables sur une large étendue et parfois s'étendre à des pays limitrophes. Il en résulte que les problèmes d'assurance de ces centrales sont insolubles à l'échelle des compagnies pri-

vées et ne pourront recevoir de solution que si les États acceptent des garanties supplémentaires. Aux États-Unis, la garantie des compagnies d'assurance est limitée à soixante millions de dollars, celle de l'État à cinq cents millions de dollars. En Europe, un accord sur la responsabilité civile a été conclu, qui limite à quinze millions de dollars les risques que les compagnies privées accepteront de couvrir, les États devant s'engager à prendre à leur charge au-delà de cette somme les risques de sinistres plus grands.

Le traitement des déchets radioactifs.

Au cours des soixante années qui ont suivi la découverte du radium, il n'a été possible d'isoler dans le monde qu'environ trois kilos de cet élément rare. Aujourd'hui, c'est par centaines de tonnes de radium que s'évalue l'équivalence de la radioactivité d'un grand réacteur de puissance en marche, et les problèmes techniques, psychologiques et politiques résultant de cette radioactivité intense sont parmi les plus difficiles que la nouvelle industrie nucléaire aura à résoudre, au fur et à mesure d'ailleurs que les applications bénéfiques de ces sources de radiation deviendront plus nombreuses.

Pendant très longtemps, les quantités de sous-produits radioactifs liés aux développements de l'industrie atomique seront de beaucoup supérieures à celles mises en jeu dans leurs utilisations éventuelles, et les difficultés posées par leur existence ne cesseront de croître.

Dans la très grande majorité des cas, et bien entendu dans celui des réacteurs surgénérateurs de l'avenir, le fonctionnement d'un réacteur de puissance doit être accompagné après un certain temps d'irradiation d'un traitement chimique des éléments de combustibles nucléaires. Cette opération chimique, qui permet la récupération du combustible nucléaire non utilisé, peut être nécessaire dès que le combustible commence à se déformer sous l'effet d'une marche prolongée de la pile ou au moment où sa teneur en matière fissile est devenue trop faible. Ce traitement est également nécessaire pour permettre, en vue d'une utilisation ultérieure, la séparation du plutonium produit dans les barres d'uranium naturel irradiées.

Si le plutonium est destiné à des fins militaires, il doit être extrait quand il atteint dans l'uranium une teneur comprise entre quelques parties pour mille et un pour mille; au-delà il commence à être souillé par l'apparition, sous l'effet des neutrons, de son isotope 240, qui intervient de façon défavorable dans l'explosion. Il en résulte que le temps de séjour de l'uranium naturel dans une pile doit être de durée moindre si celle-ci est exploitée pour des buts militaires, et non pour des buts purement pacifiques, et l'économie de l'opération s'en ressent.

Le traitement chimique des combustibles irradiés est donc un chaînon pratiquement indispensable dans la chaîne des étapes de la technologie atomique. Les usines de traitement, aujourd'hui servant surtout à des fins militaires, mais demain civiles, sont la source majeure des déchets radioactifs. Ceux-ci se trouvent répartis essentiellement dans deux sortes d'effluents liquides, les uns concentrés contenant l'ensemble des produits de fission, et de ce fait extrêmement actifs, les autres dilués peu radioactifs, mais d'un volume beaucoup plus important.

Les effluents dilués peu radioactifs, trop volumineux pour être stockés, sont traités dans des installations chimiques spéciales qui séparent sous forme solide les produits radioactifs et laissent une eau résiduaire d'activité suffisamment faible pour qu'il soit possible de la rejeter dans un fleuve, même si les eaux de celui-ci doivent être utilisées, en aval du point de rejet et de dilution, comme eaux potables. Le problème, techniquement soluble bien que coûteux, nécessite des contrôles stricts et peut poser des problèmes complexes pour les États riverains, dans le cas du rejet dans des fleuves internationaux comme le Rhin.

Les Anglais rejettent leurs effluents dilués peu radioactifs dans la mer d'Irlande, à des distances suffisantes de la côte, pour que la dilution soit rapidement obtenue, de telle sorte que la contamination éventuelle des poissons vivant dans les zones de rejet ne puisse présenter aucun danger s'ils sont ultérieurement consommés par l'homme. Cette solution, objet de nombreuses critiques, en particulier de l'Union Soviétique, ne peut se généraliser sans risquer de représenter un début de conta-

mination des eaux du globe. En revanche, le dépôt dans des mines convenablement choisies ou des tunnels désaffectés étanches, ou surtout l'immersion dans l'Océan de blocs de béton contenant et fixant des solides peu radioactifs, semblent à ce jour des solutions raisonnables; la dernière a suscité en France en fin 1960 une campagne de presse aboutissant à des craintes nettement exagérées, fondée sur des considérations plus émotionnelles que scientifiques.

Enfin, pour les effluents liquides de haute radioactivité (c'est-à-dire les produits de fission concentrés), les pays intéressés à l'heure actuelle — essentiellement les puissances militaires atomiques — les stockent sous la forme la plus concentrée possible dans des cuves étanches souterraines, qui doivent être refroidies en raison de l'énergie de radiation dégagée. Cette solution ne peut être que temporaire : aux États-Unis, les stocks de cette nature atteignent déjà plusieurs centaines de milliers de mètres cubes. Elle présente l'avantage de permettre s'il y a lieu le traitement éventuel de ces effluents pour en séparer les différents constituants radioactifs en vue d'utilisation industrielle ultérieure comme source de radiations intenses.

On évalue que la production cumulée aux États-Unis atteindra aux environs de 1980, sous forme de radioéléments à vie longue, l'équivalent de plusieurs dizaines de milliers de tonnes de radium dont la dispersion pourrait être certainement nuisible pour la vie à la surface du globe. La solution de stockage en cuve souterraine étant appelée à devenir insuffisante, il est envisagé de transformer les déchets par adjonction de certaines substances en solides insolubles, en les soumettant par exemple à une sorte de vitrification. Ces masses solides où les matières radioactives seraient définitivement emprisonnées pourraient être à leur tour enfermées dans des containers et enterrées dans des sols convenables ou même, hypothèse envisagée, déposées sur la calotte glaciaire.

Une autre solution à l'étude aux U. S. A. est l'envoi direct des solutions de haute activité dans des structures géologiques convenables, dans des mines de sel ou dans d'anciens puits de pétrole désaffectés.

Ces quelques exemples montrent l'ampleur et la diffi-

culté du problème qui trouvera certainement des solutions satisfaisantes, mais nécessairement au prix d'une charge financière à incorporer dans le coût de l'électricité d'origine nucléaire.

L'effet biologique des radiations.

L'effet sur le milieu vivant des rayonnements émis par les substances radioactives a été découvert en Allemagne au début du siècle, deux ans après l'isolement du radium. Pierre Curie, en l'apprenant, indifférent au danger, exposa son bras à l'action du rayonnement du radium et obtint une lésion, sorte de brûlure très lente à cicatriser; Henri Becquerel a été atteint de la même manière pour avoir transporté un tube de radium dans la poche de son gilet. La possibilité de détruire au sein de l'organisme des cellules cancéreuses par les radiations fut alors envisagée : ainsi naquit la curiethérapie, aujourd'hui encore un des moyens les plus efficaces de lutte contre le cancer.

Les rayonnements émis par les corps radioactifs, qu'ils soient corpusculaires, constitués de particules dotées d'énergie élevée, ou électromagnétiques, abandonnent leur énergie tout au long de leur passage dans la matière. Ils le font, soit en brisant les grosses molécules, soit en arrachant des électrons aux atomes rencontrés, et laissent derrière eux un chapelet de charges électriques. Il y a ionisation de la matière, et les rayons émis par les substances radioactives sont souvent appelés de ce fait rayonnements ionisants.

Un tel effet ionisant peut provoquer de graves atteintes dans la cellule, entraîner la mort de celle-ci, ou bien altérer ses possibilités de division, ou enfin endommager les chromosomes et leurs gènes, vecteurs des caractères héréditaires.

Les effets des radiations ionisantes sur un être vivant dépendent de multiples facteurs physiques et biologiques : d'abord la nature du rayonnement intervient par sa pénétration. Les grosses particules, comme les rayons alpha du plutonium, ont des parcours très réduits de l'ordre d'une fraction de millième de millimètre; de ce fait, elles ont un effet plus massif et localisé, l'énergie étant dissipée

dans un très faible volume. En revanche, les électrons (rayon bêta) et les rayons électromagnétiques (rayons gamma) dispersent leur énergie sur un trajet beaucoup plus long et leur action locale est donc de nature très différente, pouvant permettre la survie de la cellule atteinte et dans certains cas une restauration de ses fonctions.

Un deuxième facteur est la localisation de la source de rayonnement par rapport à l'organisme : si la source est externe, l'individu ne subira son action que pendant la période où il se trouvera exposé au faisceau de rayons émis, tandis que si la source est à l'intérieur du corps à la suite d'une contamination radioactive, l'organisme en subira l'action de façon constante. Cette contamination peut être superficielle et n'agir que sur la peau, ou interne par suite d'une inhalation ou d'une ingestion pouvant atteindre, par l'intermédiaire de la circulation et du milieu intérieur, des organes profonds. Un troisième facteur est la durée de l'irradiation : une dose massive distribuée en un temps très court est beaucoup plus dangereuse que la même dose étalée pendant une longue période, du fait dans ce dernier cas de l'absence de destructions cellulaires massives et d'une possibilité de restauration des cellules.

Du point de vue biologique, il faut faire une distinction entre une irradiation totale du corps et une irradiation localisée, n'atteignant que certains organes, beaucoup moins dangereuse. Les effets sur l'être vivant peuvent par ailleurs être classés en effets somatiques, qui agissent seulement sur l'individu irradié, et en effets génétiques qui, par suite d'une atteinte des organes sexuels, peuvent se répercuter sur la descendance.

Les tissus de l'organisme les plus sensibles aux radiations sont ceux dont les cellules se divisent et se reproduisent de façon constante, comme la peau, les muqueuses internes, les tissus générateurs du sang comme la moelle osseuse et la rate, et les glandes génitales dont la production de cellules germinales peut être fortement diminuée par une dose intense de radiation. En revanche, les cellules nerveuses ou musculaires, qui ne se reproduisent pas, sont très résistantes aux radiations. D'autres organes peuvent avoir des sensibilités spécifiques, comme c'est le cas du cristallin des yeux vis-à-vis des neutrons.

Les effets somatiques, contrairement à ceux qui affectent les organes génitaux et les cellules de reproduction, peuvent être l'objet d'effets de restauration, car les tissus des organes lésés peuvent récupérer leurs fonctions normales après une irradiation limitée en dose et en durée. Mais si l'irradiation est continue, elle peut avoir des effets irréparables, à manifestation souvent tardive : c'est le cas par exemple des brûlures de la peau ou radiodermites qui, après un certain nombre d'années, peuvent devenir le siège d'un cancer cutané comme chez les premiers radiologistes, c'est aussi le cas des cancers du poumon que l'on a observés chez les travailleurs des mines d'uranium à la suite de l'inhalation de poussières radioactives, c'est enfin le cas des leucémies, véritables cancers du sang, qui peuvent apparaître, soit à la suite d'irradiations brèves, mais très intenses, soit à la suite d'irradiations continues de faible intensité, dues à la présence d'éléments radioactifs dans les os, irradiant la moelle osseuse.

Les troubles aigus, qui apparaissent immédiatement après l'exposition aux rayonnements, surviennent dans les cas d'irradiation massive et subite et sont généralement mortels. Ils peuvent d'abord se manifester par des nausées et des vomissements, par un affaiblissement général, par des hémorragies intestinales. Si les doses distribuées ont été très élevées, la mort survient en quelques jours, irrémédiablement.

Il faut certainement tenir compte, pour apprécier le danger d'une irradiation, du débit de distribution de la dose et du volume des tissus irradiés; ainsi une dose qui a plus d'une chance sur deux d'être mortelle si elle a été distribuée en une seule fois en atteignant la totalité du corps, ne fera aucun dommage apparent si elle a été administrée sur la paume de la main ou si elle est donnée sur tout le corps en vingt ans. En revanche, l'ingestion de petites quantités de substances radioactives à vie longue qui se fixent dans les os comme le radium, le plutonium ou l'un des produits de fission à vie longue, le radio-strontium 90, peuvent avoir une action nocive à longue échéance sur la moelle des os, aboutissant dans les cas les plus graves à des leucémies mortelles.

Les premiers accidents de ce genre ont atteint vers

1925 aux États-Unis des ouvrières qui peignaient les cadrans des montres lumineuses et suçaient pour l'effiler le pinceau imprégné de peinture au radium. On vit apparaître chez elles des cancers de la mâchoire résultant de l'irradiation de l'os par les éléments radioactifs fixés au niveau des dents. Ces accidents étaient dus à l'ignorance à cette époque du danger encouru.

Après les explosions atomiques, la présence dans l'atmosphère du radio-strontium libéré par les processus de fission a créé un danger nouveau dont la propagande antiatomique s'est largement emparée. Étant donné sa longue période (vingt-huit ans) on en retrouve aujourd'hui dans les os de tous les êtres vivants à la suite de son introduction dans le cycle alimentaire. Son action est sans doute peu importante, mais si l'on se place dans l'hypothèse la plus défavorable, sur les fondements de laquelle les données scientifiques font encore défaut, celle de l'absence d'un seuil dans l'induction des leucémies, l'effet du radio-strontium devrait être retenu et rendu responsable de quelques centaines de cas de leucémie en plus des quelque deux cent cinquante mille cas frappant annuellement la population du globe.

Il faut de plus tenir compte de ce que l'homme est constamment soumis à des irradiations d'origine naturelle. Celles-ci sont de provenance terrestre et stellaire. Les premières découlent de la présence d'uranium et de ses descendants radioactifs dans l'écorce terrestre et aussi de potassium, élément légèrement radioactif toujours présent dans le corps humain. Les secondes sont dues à un rayonnement très pénétrant, le rayonnement cosmique, en provenance des étoiles, dont l'origine exacte est aujourd'hui encore inconnue. Les rayons cosmiques, par action sur l'azote atmosphérique, forment de plus dans l'air du radiocarbone C 14, isotope du carbone de période d'environ six mille ans, qui se trouve dans tous les tissus vivants : le corps d'un adulte en contient, plus ou moins uniformément réparti, une dose infime correspondant néanmoins à plus d'une centaine de milliers de désintégrations par minute.

Suivant les circonstances géographiques et géologiques, les doses de radiation naturelle peuvent varier : le rayon-

nement cosmique est trois fois plus puissant à trois mille mètres d'altitude qu'au sol. La radioactivité naturelle du sol est trois fois plus élevée que la moyenne dans une région granitique comme la Bretagne.

Au niveau de la mer et en terrain moyen, un individu reçoit par an environ deux à trois fois plus de radiations par radioactivité naturelle que par rayonnement cosmique.

Ces doses de rayonnement naturel sont bien entendu de faible intensité; elles sont du même ordre de grandeur que les doses dues aux rayonnements créés par l'homme et que reçoit en moyenne actuellement une population de pays développé, comme la population française, du fait des examens médicaux aux rayons X, ou dans une moindre mesure du fait du port des montres lumineuses.

Il est extrêmement difficile d'évaluer les effets génétiques des radiations ionisantes à la fois d'origine naturelle et artificielle auxquelles sont soumises les populations entières du globe, car les bases expérimentales sur l'action de ces doses faibles manquent totalement chez l'homme.

Les effets génétiques sont dus aux dommages créés par les rayonnements sur les gènes des chromosomes des cellules des organes génitaux. Ces lésions conduisent à des mutations, c'est-à-dire à des modifications se transmettant héréditairement et ayant des conséquences sur les descendants des personnes irradiées. Elles ont été découvertes par le biologiste américain Hermann Muller en 1927. Celui-ci put effectivement démontrer que l'exposition aux rayons X de la mouche drosophile crée des mutations par rapport à l'espèce originale.

L'effet génétique des radiations est cumulatif, car il n'y a pas récupération des atteintes : un gène altéré ne peut être restauré et chaque irradiation augmente la probabilité des mutations, celles-ci se maintenant et se manifestant dans les générations successives, d'où l'aspect angoissant du problème pour les populations humaines. Pour l'homme, on en est aujourd'hui encore réduit à extrapoler des expériences faites sur l'animal, de la mouche au rat, au chien et au singe. De celles-ci, l'on peut déduire que les doses d'irradiation reçues par un

être humain seraient à l'origine peut-être de 15 à 20 % des cinq mille mutations naturelles que subissent les gènes d'un être humain pendant sa vie, c'est-à-dire que la plupart des mutations ont d'autres causes, dont certaines sont sans doute chimiques.

Ces mutations sont responsables de un à trois millions de cas anormaux qui apparaissent chaque année dans la population du globe. Il faut insister sur le fait que seule une très faible fraction de ces mutations aboutissent à des conséquences graves, comme des malformations, ou des retards du développement chez les enfants, qui malheureusement, bien souvent dans nos pays, sont plutôt le résultat de l'alcoolisme ou de la syphilis.

Les retombées radioactives dues aux explosions nucléaires réalisées à ce jour correspondent pour l'hémisphère nord (le plus souillé) à une augmentation moyenne d'environ 2 à 3 % de l'irradiation d'origine naturelle. Cette augmentation est la même que la majoration d'intensité des rayons cosmiques pour une élévation de deux à trois cents mètres d'altitude.

Ainsi les effets génétiques dus aux explosions nucléaires passées seront, sinon nuls, du moins négligeables par rapport à ceux dus aux radiations naturelles et artificielles. Ce n'est que dans le cas d'un accroissement continu des explosions et de la puissance de celles-ci que l'on arriverait à des effets notables, ce qui serait certainement le cas dans l'hypothèse d'une guerre nucléaire.

L'utilisation médicale des rayonnements ionisants, en particulier des rayons X pour le diagnostic, aboutit à la distribution de doses heureusement généralement localisées, mais néanmoins susceptibles d'atteindre les organes génitaux, et peut aboutir dans les pays développés à la distribution d'une dose moyenne pour l'ensemble de la population d'un ordre de grandeur comparable à celle liée aux radiations naturelles. Les bienfaits que peut en retirer chaque individu ne sont certes pas négligeables, et justifient l'emploi médical des rayonnements. Néanmoins toutes les mesures doivent être prises pour éviter la répétition des examens inutiles et pour imposer un contrôle destiné à réduire au minimum les doses distribuées.

La protection des travailleurs et du public.

Une solution satisfaisante du problème de la protection contre les effets biologiques des rayonnements est une condition absolue de la réussite du développement de l'énergie atomique civile. Ce fait a été compris dès 1943 par les responsables de l'entreprise américaine militaire et il est certain que jamais une industrie nouvelle ne s'est développée avec un tel souci de protection de la santé des travailleurs professionnellement exposés et du public.

J'ai connu avant la guerre la façon dont on manipulait le radium dans les laboratoires scientifiques; les recommandations de protection n'étaient pratiquement pas respectées. Les normes aujourd'hui admises au point de vue des doses admissibles sont près de cent fois plus sévères que celles qui étaient conseillées aux chercheurs, dont les travaux étaient alors effectués souvent au détriment de leur santé, sinon de leur vie.

Ces précautions sont indispensables, car le danger des rayonnements pour l'homme est réel, et de plus il a été présenté généralement par la grande presse au public de telle façon que la radioactivité suscite une crainte bien plus grande qu'aucun autre des dangers de la nature ou de ceux que l'homme n'a cessé de créer lui-même en fonction des progrès de la technique. Même en l'absence de toute propagande politique, le complexe créé par le danger des irradiations sera le plus grand obstacle psychologique à surmonter dans le développement industriel de la fission. Ces rayonnements si étranges par leur nature, et que l'on ne peut ni sentir ni voir, se sont véritablement fait connaître au monde par la tragédie d'Hiroshima et l'accident des pêcheurs japonais de 1954. Leurs éventuels effets génétiques toujours invoqués sont difficiles à évaluer avec précision, et font l'objet de controverses entre savants. Ils apparaissent ainsi comme très mystérieux et redoutables aux yeux du grand public toujours sensible à ce qui touche la santé des enfants, les problèmes sexuels et le cancer.

Il sera donc toujours extrêmement difficile de faire accepter au public un accident de radioactivité provenant d'un établissement nucléaire scientifique ou indus-

triel; heureusement, à ce jour, aucun incident de ce genre n'a jamais porté atteinte à la santé de personnes extérieures au personnel d'un centre atomique. Il pourrait ne pas toujours en être ainsi, et il est probable qu'un sinistre sérieux, faisant autant de victimes à l'extérieur d'un établissement atomique qu'un tragique mais banal accident d'aviation, retarderait de plusieurs années le développement de l'énergie atomique industrielle. Les mesures de protection qu'il est nécessaire de prendre dans la mise en œuvre de la nouvelle industrie devront être extrêmement étudiées et respectées si l'on veut dans quelque vingt ans pouvoir installer des centrales nucléaires aux abords des villes et de leur banlieue.

Une des principales difficultés du problème de la protection réside dans le fait que les rayonnements ionisants étant sans action sur les organes des sens, les doses distribuées ne peuvent être décelées et évaluées que par des appareils de mesure indispensables pour la surveillance du personnel. Elles doivent être strictement maintenues à ces niveaux inférieurs aux normes de sécurité.

Ces normes ont été fixées par des commissions internationales (dont la première s'est réunie en 1928 sous l'égide du Congrès International de Radiologie) de façon que leur effet pendant toute une vie de travail ne provoque aucun dommage. Elles ont été difficiles à établir par suite du manque de connaissances scientifiques irréfutables; elles ont fait et font encore l'objet de révisions fréquentes.

Pour un homme professionnellement exposé, les normes de sécurité sont différentes suivant qu'il s'agit d'irradiations d'origine externe ou d'irradiations d'origine interne à la suite de pénétration à l'intérieur de l'organisme par les voies digestive, respiratoire ou cutanée, de substances radioactives.

Elles ont été établies en fonction des expériences sur les mammifères, d'après les lésions observées chez l'homme (médecins radiologistes, chercheurs irradiés au cours de leurs travaux, peintres utilisant des substances lumineuses radioactives, personnes exposées accidentellement aux rayonnements) et tenant compte des doses de radiation naturelle à laquelle toute la population du globe est

exposée. Pour la dose maximum admissible pour les travailleurs professionnellement exposés, la norme adoptée est environ vingt fois supérieure à la dose moyenne que les populations des pays développés reçoivent par radiation naturelle et examens médicaux aux rayons X.

Les dangers des rayonnements sont fonction de leur nature et des conditions de l'émission et de l'irradiation résultante. En effet, la dose reçue décroît proportionnellement à l'inverse du carré de la distance de la source. Elle est en outre fonction de l'épaisseur et de la nature de la matière traversée : l'absorption par la matière filtrante est plus élevée à épaisseur égale pour les substances de densité élevée comme le plomb. On se protège donc des rayonnements pénétrants par des manipulations à distance et des écrans protecteurs en matière dense.

Pour les neutrons émis par une pile en fonctionnement, la protection se fait en incorporant au blindage de béton des substances absorbantes spécialement pour ces particules. Pour les substances radioactives émettrices de rayonnements peu pénétrants, comme le plutonium, il suffit d'utiliser des gants et des vêtements protecteurs et de ne les manipuler que dans des hottes closes et ventilées, pour éviter tout contact avec la peau ainsi que tout danger d'inhalation ou d'ingestion. Les galeries d'exploitation dans les mines d'uranium doivent être ventilées afin d'éliminer à l'extérieur les poussières radioactives et l'émanation radioactive gazeuse émise par le radium : le radon. Les mineurs ainsi que les ouvriers doivent dans certains cas porter le masque contre les poussières. De même, les usines de traitement des barres irradiées et les laboratoires où sont manipulées des quantités dangereuses de radioéléments doivent être très fortement ventilés; des filtres interposés sur leur trajet arrêtent les poussières véhiculées par l'air de ventilation avant son rejet dans de hautes cheminées.

Tout liquide pollué par des produits radioactifs doit être traité dans des installations spéciales pour que la concentration en substances radioactives soit ramenée à la dose de tolérance avant son rejet dans le milieu ambiant — (fleuves, océans...). Les contrôles de l'atmosphère sont faits par des appareils enregistreurs fixés auprès des

grandes installations au voisinage des centres atomiques, et dans l'ensemble du pays. Ces appareils peuvent être munis de dispositifs d'alarme quand une dose dangereuse est atteinte. Un service de protection est appelé à surveiller chaque opération délicate et à fixer le temps qu'un opérateur peut passer dans des zones actives.

Des films photographiques et des électromètres sous forme de petits stylos portatifs permettent de relever hebdomadairement ou quotidiennement la dose reçue tandis que les mesures faites sur les mains et les vêtements à la sortie du laboratoire actif (ou laboratoire chaud) permettent de vérifier l'absence de danger de contamination.

Les seuls accidents mortels observés depuis vingt ans ont été dus au démarrage inattendu d'une réaction en chaîne, soit aux U. S. A. au cours de manipulations avec des substances nucléaires concentrées, soit dans le fonctionnement d'un réacteur comme en 1959 en Yougoslavie pendant une expérience effectuée sur une pile expérimentale sans protection de béton, soit enfin en 1961 aux U. S. A. à la suite de l'explosion d'un réacteur à eau bouillante provoquée par le retrait trop brusque d'une barre de contrôle. Ce dernier accident entraîna la mort des trois opérateurs présents.

L'accident le plus tragique eut lieu à Los Alamos en 1946. Le physicien américain Louis Slotin faisait une expérience avec deux masses de matière fissile séparées, mais dont la réunion serait critique. Un mouvement maladroit fit basculer une des masses vers l'autre, une lumière bleue, due au démarrage intense de la réaction en chaîne par neutrons rapides, illumina la pièce. Slotin sépara les deux morceaux puis, demandant à ses collaborateurs, plus éloignés de l'expérience que lui, de rester en place, il évalua par un rapide calcul mental les doses reçues, rassurantes pour ses collaborateurs, mais mortelles pour lui-même. Il prévint ensuite par téléphone ses parents qui purent le rejoindre et être à ses côtés neuf jours plus tard lors de son décès.

Pour les victimes de l'accident yougoslave, transportées d'urgence à Paris, un traitement massif d'injections

répétées de moelle osseuse, appliqué pour la première fois sur l'homme dans cette tragique occasion, a permis de sauver la vie aux travailleurs irradiés à l'exception de l'un d'eux, qui avait reçu une dose trop élevée.

L'expérience montre, qu'en général, de tels accidents sont le résultat de la non-observation ou de l'absence de consignes précises. Il est maintenant reconnu qu'un réacteur atomique, même de très faible puissance, doit être mené avec la même discipline que celle imposée à l'équipage d'un navire. Un système d'équipes de quart, et à chaque moment un responsable unique, seul maître à bord, sont indispensables, surtout pour les réacteurs de recherche où des incidents de marche peuvent être provoqués par les expérimentateurs; ceux-ci comme les passagers d'un bateau doivent observer des consignes de stricte discipline et accepter l'autorité du responsable de la conduite de la machine.

Ainsi apparaît le danger qu'il pourrait y avoir à installer un réacteur de recherche sans s'être assuré de la qualité de l'équipe qui le fera fonctionner. Ce danger pose le problème de la dissémination des réacteurs de recherche dans les universités des pays avancés, ou dans les pays en voie de développement.

Toutefois, en dépit des rares accidents mentionnés, auxquels il faut ajouter celui de l'incendie de Windscale en 1957, et grâce aux dispositifs de sécurité et à la stricte surveillance du personnel exposé, on peut dire que l'énergie atomique est sans doute la branche de l'industrie où il y a actuellement le moins d'accidents du travail. Ces résultats ne sont possibles que par la mise en œuvre de moyens coûteux qui représentent dans les installations atomiques une fraction notable des frais de fonctionnement.

La protection du public n'est pas moins importante que celle des travailleurs et les problèmes relatifs à l'implantation géographique de tout nouvel établissement atomique doivent être l'objet d'études poussées de façon à réduire au minimum, dans l'éventualité de sinistres très improbables, les risques pour la population. L'évacuation momentanée des habitants d'une petite localité voisine d'un établissement atomique est une mesure qui pourrait

avoir à être envisagée dans le cas d'un accident grave entraînant un danger d'irradiation radioactive qui heureusement ne s'est jamais produit jusqu'à maintenant.

C'est la raison pour laquelle les grands réacteurs atomiques sont encore aujourd'hui construits dans des régions de faible densité de population, à environ une dizaine de kilomètres au moins de grandes agglomérations, car l'évacuation de celles-ci ou même d'une de leur banlieue risquerait de poser des problèmes presque insolubles.

Dans les conditions normales de fonctionnement, un contrôle de l'évacuation des effluents gazeux et liquides doit être effectué de façon à s'assurer que les populations ne sont pas exposées à des irradiations nocives. Des normes de sécurité très strictes ont été établies par divers organismes internationaux et nationaux, qui ont conclu que pour l'ensemble de la population, on peut envisager sans aucun danger, spécialement d'ordre génétique, un doublement de la dose reçue du fait de l'existence des radiations naturelles.

Une attention croissante est actuellement attachée à l'éventuelle contamination des aliments à la suite de la présence dans l'air, l'eau et le sol de certains radioéléments. Les modalités propres à la répartition des substances radioactives dans les divers organes des animaux ou dans les plantes pourraient aboutir à entraîner des concentrations élevées dans certains produits alimentaires. Dès maintenant, un effort important de recherche est effectué dans le but de connaître le comportement des divers radioéléments intéressés dans toutes les étapes des différentes chaînes alimentaires qui fournissent à l'homme ses aliments essentiels.

Ces recherches, comme celles sur les effets génétiques des radiations, justifient le développement d'une science nouvelle, la radiobiologie, complément indispensable de tout effort atomique d'importance.

Mais même en l'absence des résultats de ces recherches indispensables, les données scientifiques actuelles permettent à l'homme dès aujourd'hui de se protéger contre l'effet nocif des radiations ionisantes résultant de l'industrialisation de l'énergie nucléaire. Ces radiations ionisantes ne sont d'ailleurs pas seulement une source de dangers

potentiels, mais aussi dès maintenant à la base d'un magnifique domaine d'application, celui des radioéléments artificiels.

Les radioéléments artificiels en biologie et en médecine. La découverte des radioéléments artificiels (ou radioisotopes) suivie de celle de la fission de l'uranium et de sa mise en application dans les piles atomiques a, en effet, du jour au lendemain, considérablement amplifié la gamme et les quantités de radioéléments disponibles pour les applications pratiques.

Au lieu d'être limité au radium et aux quelques radioéléments naturels qui en dérivent, il est possible de fabriquer dans une pile, en dehors des nombreux produits de fission de l'uranium, des isotopes radioactifs de presque tous les éléments de la classification périodique, en soumettant ceux-ci à l'action des flux neutroniques intenses qui existent dans la pile en fonctionnement. Les radioéléments artificiels produits dans une pile ont des périodes qui varient entre une fraction de minute et quelques milliers d'années; en pratique, on est limité à l'utilisation de radioéléments dont la période radioactive n'est pas trop courte.

Ces radioéléments peuvent tous être facilement isolés et purifiés par quantités représentant des poids souvent impondérables de matière, mais très faciles à évaluer avec précision grâce à la mesure du rayonnement dans des compteurs du type Geiger.

Les radioéléments artificiels sont en général des émetteurs de rayons bêta, dont l'énergie, et par suite la pénétration, peut varier considérablement suivant le radioélément considéré, allant d'une mince feuille de cellophane à une lame de métal de plusieurs millimètres d'épaisseur. De plus, les éléments émetteurs de rayons bêta sont aussi souvent émetteurs de rayons gamma très pénétrants, qui nécessitent pour les arrêter des épaisseurs de matière beaucoup plus considérables.

Depuis 1948, les commissions de l'énergie atomique américaine, anglaise puis française ont mis à la disposition de la recherche, de l'industrie et de la médecine un choix de plus de cent radioéléments artificiels différents

par leur nature chimique, leur rayonnement et leur période. Ces commissions livrent chacune par an, actuellement, des milliers de sources de rayonnement à la fois aux utilisateurs nationaux et à ceux des pays étrangers. Les bienfaits que l'on peut attendre de l'application de ces nouveaux outils de recherche sont si considérables qu'il a paru, dans l'intérêt national, d'en encourager l'utilisation en les livrant sans bénéfice, à un prix très peu élevé, représentant à peine les frais de manipulation. La garantie exigée maintenant des utilisateurs est une connaissance vérifiée des dangers que représente la manipulation des corps radioactifs et le respect des normes de sécurité et de protection.

C'est en biologie que les radioisotopes ont trouvé leurs premières applications originales, comme « traceurs », car ils permettent par les rayonnements qu'ils émettent, de suivre un élément ou une substance chimique dont on veut connaître le comportement dans l'organisme vivant. En effet, la science n'avait jusqu'à présent aucun moyen de distinguer certains atomes d'un élément déterminé dans un mélange avec d'autres atomes de ce même élément. Il en résultait que des problèmes même très simples n'avaient jamais pu être résolus.

Ainsi, jusqu'à ces dernières années, il n'était pas possible de connaître de quelle façon exacte se disperse dans l'organisme, puis s'élimine, un verre d'eau que l'on vient de boire, car rien ne pouvait différencier les molécules d'eau absorbées avec celles déjà présentes à l'intérieur du corps. Si une très faible fraction de l'hydrogène de ce verre d'eau est remplacée par du tritium (l'isotope radioactif de l'hydrogène utilisé dans la bombe H, en tout point identique pour son comportement chimique à l'hydrogène ordinaire, mais émettant de plus des rayons bêta qu'un simple instrument de mesure permet de déceler sans difficulté), le problème est alors résolu et l'on trouve que l'eau absorbée, marquée au tritium, n'est éliminée que petit à petit en un mois environ après s'être mélangée à l'eau présente à l'intérieur du corps.

Ainsi l'utilisation des éléments marqués permet de suivre en détail, en biologie, le comportement des traces des éléments les plus variés, les divers composés qu'ils

forment et leur emplacement exact. On peut dire que les éléments marqués radioactifs représentent probablement le plus puissant instrument de recherche depuis l'invention du microscope.

Les traceurs radioactifs sont devenus aujourd'hui un très important outil de diagnostic médical, car ils permettent d'étudier sur les organismes vivants le métabolisme, c'est-à-dire le comportement des substances les plus diverses, comme par exemple : l'absorption du radioiode par la glande thyroïde qui donne une excellente indication du fonctionnement de cet organe — l'étude de la circulation sanguine par injection dans le torrent circulatoire soit de globules marqués au radio-fer, soit de sérum sanguin marqué par des corps radioactifs — la détection de certaines tumeurs par fixation sélective de radioéléments — enfin la délimitation exacte d'un tissu atteint par la gangrène ou présentant des troubles circulatoires, par injection de radiosodium dans le sang qui n'atteint pas les zones où la circulation sanguine est déficiente.

De nombreuses molécules organiques complexes, marquées au radiocarbone, au tritium ou au radiosoufre ont pu être préparées en vue de l'étude de leur métabolisme; des recherches de haute qualité ont pu être faites sur de nombreuses substances qui jouent à l'état de traces des rôles fondamentaux dans l'organisme, comme les vitamines et les hormones. Des travaux très intéressants se développent à l'heure actuelle à l'aide de bacilles et de virus artificiellement marqués avec des éléments radioactifs.

Un autre domaine où l'utilisation de radioisotopes a déjà rendu de très grands services au médecin est celui de la radiothérapie. Il est maintenant possible de constituer, pour le même prix que celui de quelques grammes de radium, des sources de rayonnements pénétrants équivalentes en qualité mais mille fois supérieures en intensité, à partir du radiocobalt (de période cinq ans, obtenu par irradiation neutronique du cobalt). Une seule de ces sources, si elle était constituée par du radium, nécessiterait une quantité de l'ordre de grandeur de tout le radium isolé à ce jour sur terre.

D'autre part, les radioéléments artificiels, par la gamme très étendue des rayonnements émis et par la diversité de leur période, ont élargi le champ de la radiothérapie en donnant la possibilité d'irradiations internes; celles-ci ne pouvaient être réalisées par absorption du radium par voie buccale, en raison de la fixation dans les os et de l'action toxique du rayonnement de cet élément à vie très longue. Les radioéléments artificiels peuvent, en effet, être administrés par voie interne si leur période radioactive est suffisamment courte (de quelques jours ou de quelques semaines par exemple) pour que leur accumulation dans l'organisme n'expose pas celui-ci au danger d'une irradiation trop prolongée. Si l'on se limite à des éléments émetteurs seulement de rayons bêta, moins pénétrants que les gamma, il est possible de restreindre l'action du rayonnement à un volume réduit et connu de tissus. Enfin, la nature chimique du radioélément peut être choisie de façon que la fixation de ce produit radioactif se fasse sélectivement dans l'organe où se trouvent les cellules malsaines à détruire, cette fixation sélective constituant la base de l'utilisation thérapeutique.

Dès 1942, l'hôpital du cancer de New York fut parmi les premiers à essayer les traitements par administration buccale d'iode et de phosphore radioactifs, encore préparés au cyclotron. J'étais chargé des mesures de radioactivité sur les malades, ceux-ci, choisis parmi les cas les plus graves, espéraient beaucoup de la localisation dans leurs tumeurs de la substance radioactive dont l'effet était malheureusement difficile à apprécier et trop rarement curatif.

Les grands espoirs rapidement répandus dans le public sur l'utilisation thérapeutique des radioisotopes dans le cancer ont été en partie déçus. Seuls quelques-uns ont été retenus pour utilisation par voie interne, ce sont surtout les isotopes radioactifs du phosphore, de l'iode et de l'or (dont les périodes sont respectivement voisines de quatorze, huit et deux jours).

Le radiophosphore est fixé électivement dans certains tissus, en particulier les os, la moelle des os, la rate ou les glandes lymphatiques, ces derniers organes jouant un rôle

capital dans la reproduction des éléments du sang. Le radiophosphore a ainsi été essayé avec succès dans une affection non cancéreuse du sang, la polyglobulie essentielle, où la formation des globules rouges est anormalement rapide, provoquant des troubles sérieux pouvant aller jusqu'à la mort. Par contre, son action n'est pas supérieure à celle des rayons X dans les diverses formes de leucémies, maladies cancéreuses du sang.

Le radioiode a permis quelques cas de guérison dans des formes rares de cancer de la thyroïde et donne de bons résultats dans le traitement de l'hyperthyroïdie.

Le radio-or est utilisé sous forme colloïdale, ce qui permet de le fixer au point de la tumeur où il est injecté et de localiser son irradiation aux tissus voisins. Il est notamment utilisé pour les traitements des cancers de l'utérus et de l'estomac.

Les radioéléments artificiels ont donc dès maintenant un certain nombre d'applications thérapeutiques intéressantes dont la gamme ne peut que s'étendre dans l'avenir en même temps que les utilisations pour fins de diagnostic plus importantes au stade actuel.

Les radioéléments artificiels en industrie et en agriculture.

Les radioéléments artificiels ont deux domaines principaux d'application, suivant qu'ils servent comme source de rayonnement, ou comme éléments marqués. Les principales utilisations des radioéléments comme source de rayonnement sont la radiographie des grosses pièces métalliques et l'évaluation automatique de l'épaisseur d'une substance qui fait écran entre la source et un appareil de mesure de rayonnement, la fraction transmise variant en fonction de l'épaisseur de l'écran. On peut ainsi déterminer avec précision la hauteur à laquelle se trouve le métal en fusion dans un haut fourneau, contrôler automatiquement l'efficacité du remplissage de cartonnages comme les sachets de sucre en poudre ou les paquets de cigarettes.

Le champ d'application d'une telle méthode est très vaste, c'est ainsi qu'elle permit durant la dernière guerre à un pays neutre, la Suisse, de vérifier sans les ouvrir et

à l'insu des Allemands que des wagons plombés, en transit d'Allemagne en Italie, ne contenaient que du charbon et non pas des soldats ou des canons, ceci grâce à la mesure d'absorption à travers chaque wagon de la radiation d'une forte source de radium, absorption différente pour chacun des cas envisagés. Dans le même ordre d'idées, en utilisant des sources de rayonnements plus ou moins pénétrants, l'on peut contrôler industriellement, en continu, au fur et à mesure de leur production, l'épaisseur de feuilles de cellophane, de bandes de caoutchouc ou de tôles à la sortie des laminoirs. Actuellement le radiocobalt, plusieurs centaines de fois moins coûteux que le radium [2] remplace avantageusement celui-ci dans l'étude radiographique des soudures et des grosses pièces métalliques, telles que moulages ou blindages, permettant de déceler des défauts internes comme les rayons X le font pour le corps humain.

Les traceurs radioactifs sont aussi très utilisés dans l'industrie, par exemple en hydrologie où l'usage du tritium permet de suivre le mouvement des eaux. De même l'utilisation de grains de sable marqués rend possible l'étude du cheminement des sables dans les problèmes d'ensablement des rivières ou des ports. Les fuites de canalisations de gaz sont localisées avec grande précision par l'injection de gaz radioactif permettant la détermination de l'endroit du sol qui est contaminé par la fuite.

Des pistons racleurs de nettoyage dans un oléoduc ou un feeder de gaz et éventuellement bloqués peuvent être retrouvés grâce à une source radioactive préalablement fixée au piston.

Les problèmes d'usure peuvent être résolus par la mesure de traces d'acier dans l'huile apparaissant comme suite de l'usure d'un piston en acier radioactif, tandis que sont de plus en plus utilisées des méthodes d'analyse non destructives par activation par neutrons, qui

2. Le radium, qui avant la guerre était le principal produit extrait des minerais d'uranium et valait vingt-cinq mille dollars le gramme, n'est plus récupéré aujourd'hui; par un juste retour des choses, le jour où il est détrôné par les radioéléments artificiels produits dans les piles, il devient à son tour un résidu inutilisé de l'extraction de l'uranium indispensable au fonctionnement de ces mêmes piles.

consistent à activer par passage dans la pile, un échantillon de substance contenant l'élément que l'on veut doser.

La toxicité des peintures lumineuses au radium est un frein dans leur utilisation, mais le remplacement du radium par des émetteurs de rayons peu pénétrants comme le tritium peut permettre de faire des peintures ou des ampoules lumineuses ne présentant plus de danger.

L'utilisation de l'énergie produite par des sources intenses de radioéléments à vie longue a été appliquée récemment aux États-Unis dans des sources auxiliaires légères d'électricité pour l'alimentation de l'instrumentation de bord des satellites. Cette application très intéressante est vouée à un développement notable, même dans d'autres domaines que celui de la navigation spatiale, en particulier pour l'alimentation en électricité des émetteurs radio-automatiques de stations météorologiques polaires d'accès très difficile.

Les radiations peuvent être aussi utilisées dans l'industrie par leurs actions chimiques permettant de créer volontairement dans la matière ces changements même de structure, qui sont une gêne dans la tenue sous radiation des matériaux des centrales nucléaires. La principale utilisation industrielle de ces phénomènes à ce jour est l'irradiation des matières plastiques, comme le polythène, qui deviennent plus résistantes à la température, ainsi que le greffage, c'est-à-dire la soudure de deux matières plastiques entre elles, les deux groupes de molécules brisées sous l'effet des radiations se recombinant à la surface de contact.

Dans ce domaine des actions chimiques, des travaux sont en cours pour essayer, à l'aide des rayonnements, d'abaisser la température de cracking des hydrocarbures ou d'améliorer l'action des catalyseurs de synthèse chimique. D'une façon plus générale, on envisage l'utilisation des rayonnements des réacteurs eux-mêmes pour amorcer des réactions chimiques : transformation de l'azote et de l'oxygène en acide nitrique, oxydation de produits organiques. Si ces recherches s'avéraient fructueuses, des réacteurs nucléaires pourraient être cons-

truits un jour aux seules fins de réaliser des synthèses chimiques de cette nature.

Enfin, les propriétés bactéricides des rayonnements à très hautes doses peuvent être utilisées industriellement à des fins de stérilisation dans le cas où les substances à conserver ne supportent pas d'élévation de température : stérilisation du catgut, des tubes plastiques de perfusion et de certains médicaments et vaccins thermolabiles. Ces opérations se font sur une échelle industrielle, en particulier aux États-Unis. Cette même méthode est employée en grand en Australie pour la stérilisation du poil de chèvre servant à la fabrication de tapis.

Des doses élevées de rayonnement détruisent les bactéries et entraînent ainsi une stérilisation. L'utilisation des radiations pour la conservation des aliments a paru ces dernières années un domaine plein d'avenir, et l'intendance américaine y a consacré des sommes importantes; ces efforts se sont heurtés à des obstacles : changements de goût et d'odeur, destruction de vitamines, liés à des modifications chimiques au sein de la substance irradiée; ces changements vont rendre indispensables des années de vérification pour s'assurer que les matières ainsi traitées peuvent servir sans inconvénient à l'alimentation humaine à grande échelle. Par contre, des doses plus faibles permettent d'éviter ces inconvénients quand elles sont utilisées pour la destruction de cellules sensibles aux radiations en raison de leur rapide reproduction, c'est le cas de la destruction des germes de pommes de terre, dont on peut ainsi s'assurer une meilleure conservation.

Les applications des radioéléments artificiels en agriculture ne sont pas moins variées. Comme traceurs, ils sont employés pour mieux connaître les cycles du calcium et du phosphore ainsi que les meilleures conditions d'utilisation des engrais. On les utilise aussi dans les études de fécondation par les insectes en suivant le pollen marqué au radiophosphore, ou dans les problèmes de migration d'insectes nuisibles en chargeant ceux-ci de très faibles quantités de substances radioactives. Des

moustiques marqués ont ainsi été préparés en plongeant leurs larves dans une solution de radiophosphore.

Les rayonnements ionisants ont pu être également utilisés pour l'élimination d'une population d'insectes en stérilisant au laboratoire un nombre suffisant de mâles (relâchés ensuite dans la région intéressée), pour que les croisements stériles soient prédominants. Aux États-Unis, on est arrivé à supprimer en trois ans une population d'insectes nuisibles à l'agriculture par ce moyen.

L'utilisation des rayonnements intenses pour obtenir à longue échéance des mutations artificielles par leur action sur les chromosomes des éléments de reproduction est un moyen original de créer de nouvelles espèces végétales et d'étendre les connaissances de génétique. Il semble que dans le domaine agricole des résultats intéressants aient déjà été obtenus par l'irradiation de végétaux par les rayons pénétrants émis par de très puissantes sources de radiocobalt.

Enfin le radiocarbone 14, de période d'environ six mille ans et que l'on prépare facilement par quantités de l'ordre du milligramme dans des piles de moyenne puissance (par bombardement de l'azote par le flux de neutrons de la pile), est appelé à jouer un très grand rôle en raison de l'importance du carbone dans la chimie de la vie. Il est utilisé dans l'étude du problème capital de la photosynthèse ou assimilation chlorophylienne, processus qui permet aux plantes de transformer sous l'action du soleil le gaz carbonique de l'air en graisses et sucres assimilables. Ces sucres et graisses sont la base de l'alimentation de l'homme et de ses animaux domestiques. Des expériences sont en cours, consistant à placer des plantes dans des atmosphères riches en gaz carbonique marqué au radiocarbone, de façon à essayer de déceler les stades successifs du métabolisme du carbone aboutissant à la formation de molécules complexes indispensables à la vie. La solution de cette question apportera peut-être une contribution capitale au problème de l'alimentation, en donnant des possibilités d'accroître les quantités de nourriture disponibles à la surface du globe par l'utilisation rationnelle de la plus grande de toutes les sources d'énergie naturelle, le soleil.

Une autre application étonnante du radiocarbone est celle des datages archéologiques. La présence de neutrons dans le rayonnement cosmique des hautes couches de l'atmosphère crée dans l'air à partir de l'azote une teneur constante de radiocarbone dans le gaz carbonique présent. Étant donné qu'il y a un échange permanent de carbone entre les végétaux terrestres et l'atmosphère, la proportion de radiocarbone dans le carbone des êtres vivants est constante. Quand la substance cesse de vivre et qu'elle est soustraite aux échanges avec l'air, le radiocarbone décroît avec sa période (c'est-à-dire de moitié en près de six mille ans) et la mesure du pourcentage de carbone 14 dans le carbone d'un échantillon quelconque donne à cent ans près la date à laquelle la substance carbonée a été produite. On a pu ainsi dater l'âge des séquoias géants, des manuscrits de la mer Morte, des linceuls des momies, et résoudre avec précision de passionnantes énigmes du passé.

Mais les détectives d'aujourd'hui se servent aussi des espions radioactifs, que ce soit pour dépister des billets de banque ou un trafic de diamants rendus volontairement radioactifs, ou le chemin que prennent des voleurs nocturnes qui repartent avec leur butin sans se rendre compte que leurs chaussures rendues radioactives définissent leur trajet pour le compteur Geiger.

La criminologie a aussi utilisé la possibilité de déterminer rapidement si une personne décédée d'une façon suspecte avait été ou non empoisonnée à l'arsenic, grâce à une irradiation à la pile de quelques cheveux prélevés sur la victime et la mesure du radio-arsenic éventuellement formé. Cette méthode, qui a l'avantage de laisser les cheveux intacts comme pièce à conviction, peut même montrer l'époque à laquelle l'empoisonnement a commencé, car elle permet de localiser la fraction exacte du cheveu contenant l'arsenic.

Ainsi, grâce aux radioéléments artificiels se dessinent dans tous les domaines de la science et de la technique un nombre extraordinaire de méthodes de recherche et d'applications nouvelles qui ont l'avantage de nécessiter des

moyens relativement peu coûteux, essentiellement des appareillages électroniques de mesure aujourd'hui classiques. Un nombre croissant de pays peuvent y prendre part, en particulier ceux pour lesquels des efforts dans la production de l'énergie nucléaire seraient actuellement prématurés.

L'emploi des radioisotopes n'est pas encore aussi généralisé dans l'industrie qu'il devrait l'être, la réticence des industriels étant sans doute due à une certaine crainte des dangers pour l'homme du maniement des radiations, crainte que l'on s'efforce de combattre par la formation dans l'industrie de techniciens spécialisés dans l'emploi de ces nouvelles méthodes. Néanmoins, en 1959, on évaluait déjà aux États-Unis à une cinquantaine de millions de dollars les économies annuelles faites dans l'industrie par l'emploi de ce nouvel outil de travail et de recherche.

Bien entendu, l'emploi et la circulation des radioéléments doivent être réglementés. En France, la législation qui leur est relative réside dans le Code de la Santé publique où les radioéléments sont soumis à la législation des substances toxiques, en particulier leur emploi sur le corps humain est exclusivement limité à des fins de diagnostic et de thérapeutique, et leur délivrance est soumise à l'autorisation d'une Commission interministérielle et à la décision du ministre de la Santé publique dans les cas des applications médicales.

Le Commissariat à l'Énergie Atomique a pratiquement le monopole de fabrication des radioéléments, qu'il est aussi libre d'importer de l'étranger. En 1961, plus de mille centres français ont utilisé des radioéléments, se répartissant entre centres industriels pour deux tiers, centres de recherches pour un quart, et centres médicaux pour un dixième. Pendant cette même année, près de quatorze mille livraisons furent effectuées et réparties également entre ces trois types d'usages, ces livraisons représentant une valeur de près de deux millions et demi de nouveaux francs, dont plus des deux cinquièmes proviennent de l'exportation.

Ainsi l'utilisation des radioéléments artificiels bien que non directement liée à la production d'électricité d'origine nucléaire, se trouve être un des domaines essentiels d'ap-

plication de l'énergie atomique, heureusement à l'abri des pressions dues aux facteurs de politique et de prestige; il ne cessera de croître dans les années à venir et représentera, parallèlement à celui de la production d'électricité, un ensemble de bienfaits et une source de découvertes qui, à eux seuls, justifieront dans une mesure non négligeable, les dépenses que les gouvernements font pour le développement de l'énergie atomique.

9.

Le programme atomique français.

Les moyens.

En 1962, le Commissariat à l'Énergie Atomique aborde sa dix-septième année d'existence, son développement, caractéristique de celui du pays dans le domaine nucléaire, a été considérable; son budget pour cette année sera de deux milliards deux dixièmes de nouveaux francs, soit 3 % du budget de la nation, ce qui paraît une limite supérieure qui ne devrait pas être appréciablement dépassée dans l'avenir, à moins que les tâches confiées au C. E. A. dans le domaine de la défense ne soient encore accrues.

Jouissant d'une autonomie unique dans le pays pour un service d'État, rattaché directement au Premier Ministre qui seul peut trancher efficacement entre plusieurs ministères intéressés un éventuel conflit sur les problèmes atomiques, le C. E. A. est bien équipé pour mobiliser toutes les forces nationales, il ressemble ainsi aux larges organismes centralisés que les États-Unis et le Royaume-Uni ont aussi constitués pour diriger leur effort atomique. De nombreux pays engagés dans des programmes moins ambitieux et seulement civils ont adopté des constitutions analogues qui, à l'expérience, se sont montrées seules capables de mener à bien les tâches nécessitées par un effort atomique valable.

Les fonctions de ces grands organismes diffèrent selon le degré de responsabilité accordée à l'initiative privée. Aux États-Unis, la politique de l'A. E. C. a pour objet de confier la gestion de tous ses établissements à des organismes privés : universités (pour les centres de

recherche) et sociétés industrielles (pour les centres de production); au contraire, au Royaume-Uni, l'Autorité atomique exerce la gestion de tous ses établissements, tant industriels que scientifiques. En France, une situation intermédiaire s'est établie; certains établissements industriels de production sont confiés à des sociétés privées ou mixtes, tandis que les autres, comme le centre de production de plutonium de Marcoule, ainsi que les établissements de recherche, dépendent du C. E. A. ou exceptionnellement du C. E. A. et de l'Université, dans le cas du centre de Grenoble.

Dans le domaine industriel, la politique française comme la politique américaine consiste à faire exécuter le plus de travaux possibles par l'industrie; la politique de l'Autorité atomique britannique est différente, celle-ci étant son propre architecte industriel. Ces politiques différentes sont reflétées par la taille des organismes : au Royaume-Uni, l'Autorité a atteint en 1960 son maximum de quarante mille employés, dont environ la moitié pour le groupe industriel et les deux autres quarts respectivement pour la recherche et les applications militaires. Par contre, aux États-Unis, la Commission atomique, tout en ayant un budget supérieur à dix fois celui du C. E. A., n'emploie que six mille agents, un peu plus du tiers du total correspondant français. La tâche principale de la Commission atomique américaine est la conclusion, la surveillance et le contrôle du déroulement des contrats passés avec les universités et surtout avec l'industrie privée; ces contrats font travailler directement, pour la Commission, plus de cent mille personnes dans le pays. L'industrie privée américaine gère les grandes usines de production d'uranium 235, de plutonium et de tritium. La Commission est, d'après la loi, le propriétaire obligatoire aussi bien de ces installations que des substances produites qui peuvent être cédées sous licences à des utilisateurs privés, le gouvernement en restant propriétaire.

Le C. E. A., responsable de la production des matières fissiles concentrées, de l'étude et de la fabrication des armes atomiques, est un des instruments de la politique d'indépendance nationale manifestée par la décision du parlement, en fin de 1960, de constituer une force de dis-

suasion. Le programme résultant du C. E. A., considérable par les crédits mis en œuvre et ses objectifs, devra s'effectuer en étroite liaison avec le ministère des Armées, il correspond à un véritable changement d'orientation du C. E. A. souligné par le fait que deux tiers de ses dépenses sont actuellement liées au programme militaire. La réalisation de celui-ci impose qu'une priorité soit donnée à la fabrication de plutonium de Marcoule et à la construction de l'usine de séparation isotopique de Pierrelatte, en vue de la production ultérieure d'uranium 235. Les réacteurs de l'E. D. F. pourraient, si nécessaire, fournir un complément de production de plutonium, en cas d'accident ou de production insuffisante des piles de Marcoule. De même, pour pallier à une hypothétique défaillance de l'usine chimique d'extraction de plutonium de Marcoule, il a été décidé de construire au cap de La Hague une deuxième unité de traitement de combustibles irradiés; elle servira d'usine de secours et permettra aussi d'y séparer une fraction du plutonium produit dans les réacteurs E. D. F.

Un tel effort dans le domaine militaire, s'il déplace certaines priorités aux dépens des réalisations civiles a, par contre, l'avantage inestimable de créer dans le domaine des matériaux spéciaux comme dans celui des réacteurs les larges bases technologiques à partir desquelles chaque grande puissance atomique a pu assurer le développement industriel de l'énergie nucléaire. Mais cette nouvelle orientation présente aussi des dangers pour le programme civil dans l'éventualité de très larges dépassements des prévisions des sommes affectées aux tâches militaires, car il y aurait alors un risque que le gouvernement soit tenté de diminuer les crédits destinés aux tâches de recherche et de développement civils afin de maintenir les dépenses du C. E. A. dans l'enveloppe financière accordée.

Le programme militaire n'est pas limité aux armes et comporte un effort en vue de la propulsion navale, programme commandé au C. E. A. par la Marine nationale, et entraînant la construction à terre du prototype du moteur de sous-marin utilisant de l'uranium très enrichi et du même type que le réacteur du *Nautilus*, c'est-à-dire

refroidi par eau pressurisée; cette réalisation succède à celle d'un projet de moteur encombrant, à uranium naturel et eau lourde, qui fut heureusement abandonnée à la suite de la modification de la loi Mac-Mahon rendant possible pour la France l'achat aux U. S. A. de combustible enrichi pour un tel but militaire.

La réalisation d'un premier sous-marin nucléaire, qui suivra la mise en marche vers 1964 du prototype de moteur, est prévue dans la loi-programme militaire. En revanche, dans le domaine de la propulsion navale marchande, le C. E. A. a pratiquement renoncé à des études avancées devant les aspects peu économiques actuels de cette forme de navigation.

Dans le domaine industriel, l'effort atomique cherche, sans hâte excessive mais sans risque de délai regrettable, à préparer la France, riche en ressources nouvelles de pétrole et de gaz, à aborder le moment voulu l'époque où d'importantes quantités d'électricité d'origine nucléaire seront nécessaires pour satisfaire les besoins toujours croissants d'un pays en pleine expansion économique.

L'effort atomique industriel français, tant civil que militaire, n'a été rendu possible que par les résultats obtenus en matière de prospection d'uranium; le rôle principal y a été joué par le C. E. A. qui néanmoins, par une politique d'achat de minerai à des prix garantis, a suscité parallèlement une production privée d'une certaine importance correspondant au cinquième environ de la production nationale. Un plafond de mille cinq cents tonnes d'uranium sera atteint en 1962, dont les trois quarts seront d'origine métropolitaine et le reste en provenance de la Communauté : Gabon et dans une plus faible mesure Madagascar. Cette production se fait à un prix inférieur à celui des grands contrats canadiens et sud-africains en cours, et voisin de la valeur d'achat garantie par la Commission atomique des U. S. A. aux producteurs américains jusqu'en 1966 (huit dollars la livre d'oxyde dans des concentrés). Ce prix n'est, par contre, plus compétitif avec ceux très en baisse des quelques ventes réalisées depuis 1960 par le Canada et l'Afrique du Sud. Dans ces conditions, il est probable que malgré sa production excédentaire, la France ne pourra continuer, comme elle l'a fait

dans ces dernières années, à céder de l'uranium par quantités de l'ordre de la dizaine de tonnes à des pays comme la Suède et l'Inde.

Néanmoins, un effort méthodique de prospection se poursuit en France et dans la Communauté de façon à être prêt à augmenter considérablement la production le jour où la conjoncture imposera un rôle important à l'énergie nucléaire dans la production d'électricité nationale.

La formation des hommes et la recherche.

Non moins indispensables que l'uranium sont les techniciens, dont la formation a été un des soucis constants de l'effort atomique français.

La mise en œuvre de l'énergie nucléaire, et c'est une de ses caractéristiques, a recours à toutes les branches de la science et de la technologie, elle a besoin des chercheurs et techniciens appartenant à toutes les disciplines. Il faut, à leur formation de base, ajouter une spécialisation ultérieure qui souvent s'acquiert au sein même des établissements de recherche atomique, mais que l'on cherche de plus en plus à préparer par des enseignements spéciaux. C'est ainsi que le centre de Saclay a créé sous l'égide du C. E. A. et de l'Éducation nationale un Institut national des Sciences et Techniques nucléaires qui s'adresse aux étudiants des Universités et aux ingénieurs des entreprises industrielles, tant français qu'étrangers. Il y est entre autres organisé un enseignement de génie atomique d'une durée d'un an et de multiples cours spécialisés de troisième cycle, comme par exemple ceux de métallurgie atomique, de radiobiologie, ainsi que des sessions de quelques semaines destinées à la formation des utilisateurs de radioéléments artificiels. Des enseignements analogues se feront peu à peu dans les Universités de province : l'Université de Grenoble en particulier a déjà initié un cours de génie atomique en relation avec le Centre d'Études nucléaires de cette ville.

L'augmentation du personnel de recherche du C. E. A. ainsi que la décentralisation demandée par le gouvernement a eu pour conséquence la création des centres provinciaux de Grenoble et de Cadarache, s'ajoutant aux deux établissements de la région parisienne de Saclay et

de Fontenay-aux-Roses. Le centre de Saclay a atteint, avec environ cinq mille travailleurs, sa taille maximum, tandis que les trois autres établissements sont encore en croissance, en particulier celui de Cadarache qui sera aussi limité à mille cinq cents employés. L'administration et la gestion de ces centres géants, véritables villes de techniciens, posent des problèmes nouveaux parmi les plus difficiles à résoudre pour le C. E. A., dont l'accroissement ainsi que celui de ses établissements scientifiques sera nécessairement amené à se modérer beaucoup dans les prochaines années.

La dualité des problèmes administratifs et scientifiques qui se traduit par le bicéphalisme de la direction générale du C. E. A. se retrouve dans les établissements de recherche auxquels on est obligé de donner une large autonomie par rapport aux services centraux. Un des points toujours controversés est celui de la direction scientifique des travaux effectués dans les centres de recherche; selon les uns elle doit relever du chef d'établissement lui-même, selon les autres elle doit dépendre des grandes directions techniques du siège central, le chef d'établissement, même s'il est un technicien, devant limiter son action à l'administration générale du centre. Le C. E. A. n'a pas tranché cette question de principe et a adopté cas par cas des solutions distinctes pour chacune de ses grandes unités de recherche.

La très grande équipe actuelle, de dix-sept mille travailleurs au début de 1962, est dirigée par Pierre Couture qui a remplacé, comme Administrateur Général, Pierre Guillaumat à partir de 1958 et qui assume avec talent la lourde tâche de guider l'extension continue du C. E. A., en collaboration étroite avec le Haut Commissaire scientifique Francis Perrin; ils sont assistés d'environ douze directeurs techniques et directeurs d'établissement entre lesquels se fait la difficile coordination des activités d'un organisme si ample dans sa taille et si varié dans la matière des travaux poursuivis. L'élaboration des programmes, la répartition des tâches, et la surveillance de leur exécution et de l'utilisation des crédits correspondants sont autant de problèmes infiniment complexes; l'auteur de ces lignes, chargé depuis 1960 de la direc-

tion des programmes du C. E. A., peut en témoigner.

Les recherches scientifiques se font suivant une gamme continue, depuis la recherche fondamentale jusqu'à la recherche appliquée et semi-industrielle; les efforts principaux sont dirigés vers l'étude des piles atomiques, celle des matériaux intervenant dans leur fonctionnement et le comportement de ceux-ci sous radiation. La recherche fondamentale s'effectue dans le domaine de la structure de la matière autour de grands accélérateurs comme le synchrotron à protons Saturne, dont le coût total a atteint quatre-vingt-dix millions de nouveaux francs. Le fonctionnement d'un tel appareil, comme celui d'une pile atomique de recherche, ou de complexes laboratoires destinés à la manipulation des produits hautement radioactifs, représente des dépenses considérables annuelles du même ordre que celles encourues lors de sa construction. Ce fait est caractéristique du développement de la technique moderne.

Des recherches fondamentales sont aussi poursuivies dans le secteur d'avenir de la fusion des atomes légers et des plasmas ionisés et dans le domaine de la biologie et de l'étude de l'effet des rayonnements sur les êtres vivants. La production des radioéléments artificiels, la promotion de leur utilisation dans les multiples activités de la science, de la médecine et de l'industrie, représentent aussi une part importante et croissante de l'activité scientifique du C. E. A.

La traduction industrielle des résultats des travaux de recherche ainsi que la construction des grands ouvrages, réacteurs et usines, a amené la création de divisions nucléaires dans un très grand nombre de sociétés industrielles nationales. Des équipes précieuses de spécialistes ont été ainsi constituées dans l'industrie et une des tâches importantes mais difficiles du C. E. A. dans l'avenir va consister à chercher à maintenir le rythme des travaux confiés à l'industrie et éviter la dispersion de ces équipes à la suite du ralentissement mondial de la cadence de développement de l'énergie nucléaire par rapport aux prédictions initiales.

Un autre impératif dicté par la mise en œuvre d'un grand effort atomique est la protection de la population

et des travailleurs; ceux-ci doivent faire l'objet de précautions et de contrôle dont l'importance est imposée par le nombre croissant de personnes exposées aussi bien dans l'industrie privée que dans les mines d'uranium et les établissements de recherches, les centres industriels et leur voisinage.

Un Service central de Protection contre les radiations a été créé à l'Institut national d'hygiène; il effectue sur demande des autorités compétentes la vérification des moyens de protection et leur efficacité, il peut à cet effet pratiquer toutes mesures, analyses ou dosages permettant l'étude de la radioactivité et le contrôle des doses reçues dans les divers milieux où l'exposition aux rayonnements ionisants peut présenter des risques pour la santé des individus et de la population dans son ensemble. Sa tâche est extrêmement importante car seules des mesures de sécurité efficaces peuvent donner confiance à un public de plus en plus sensibilisé et dont les craintes croissent au moment même où l'extension des programmes impose la localisation de nouveaux centres tant de recherches qu'industriels.

Tandis qu'il y a quelques années le prestige de l'énergie atomique et l'activité commerciale locale résultant de la création d'un établissement du C. E. A. faisaient de celui-ci un objet souhaitable pour les populations intéressées, celles-ci sont aujourd'hui en général hostiles au voisinage d'un centre atomique et sont souvent soutenues dans leur attitude par les autorités locales. De ce fait, l'implantation de chaque nouveau centre du C. E. A. nécessite un effort accru de relations publiques, comme aussi la solution du problème malheureusement déformé du rejet des déchets radioactifs.

Le programme d'avenir.

Le deuxième plan quinquennal atomique en cours d'achèvement place la France dans un état d'avancement qui lui permet d'aborder plusieurs voies nouvelles conduisant à des réalisations qui, pour la plupart, seront achevées aux alentours de 1965. La plus importante d'entre elles est l'usine de séparation isotopique de l'uranium 235, qui sera l'usine la plus coûteuse qui ait jamais

été construite en France. Pour la première fois, une réalisation du C. E. A. est à l'échelle financière et technique de l'effort du pays tout entier comme le serait aussi la construction du tunnel ou du pont reliant la France à l'Angleterre.

Le procédé mis en œuvre, utilisant la diffusion gazeuse de l'hexafluorure d'uranium, est celui employé par les trois grandes puissances atomiques qui ont encore aujourd'hui le monopole de la production d'uranium 235. Le *know how* technologique correspondant est à ce jour le dernier bastion du secret atomique et l'industrie française a dû mettre au point, seule, la fabrication des délicates barrières poreuses à travers lesquelles s'effectue la diffusion de l'hexafluorure d'uranium ainsi que la construction des compresseurs compliqués correspondants. Les techniques de réalisation du vide poussé à grande échelle industrielle seront aussi réalisées pour la première fois dans notre pays à cette occasion.

L'usine sera plus petite que celle qui avait été prévue comme entreprise commune pour Euratom lors de la négociation du Traité. Celle-ci avait été envisagée pour une capacité à l'entrée de mille tonnes d'uranium par an, correspondant à une production de trois tonnes d'uranium 235 à des concentrations variées, avec une consommation annuelle d'électricité de deux milliards de kilowattheures, soit environ 1 % de la consommation actuelle de la petite Europe, et pour un coût total évalué alors, sans doute très insuffisamment, à quelque cinq cent millions de dollars.

L'usine française actuellement en construction est réalisée par un groupement de sociétés industrielles françaises; elle est située à Pierrelatte dans la vallée du Rhône, de façon à pouvoir profiter du complexe local de production d'électricité hydraulique car l'hexafluorure d'uranium n'étant à l'état gazeux qu'au-dessus de cinquante degrés centigrades, il faut pouvoir éviter tout arrêt et refroidissement de l'ensemble de l'usine qui est extrêmement difficile à remettre en marche lorsque son fonctionnement a dû être interrompu. Cette usine, bien que très modeste si on la compare aux usines de diffusion gazeuse américaines, nous rangera au rang des grandes

puissances atomiques au moins autant que la possession de l'arme atomique. La matière fissile concentrée ou légèrement enrichie qui y sera obtenue, à des prix certes très supérieurs au prix américain, sera libre de tout contrôle et utilisable à notre gré pour une fraction importante de nos besoins militaires ou civils et permettra entre autres d'échapper aux lenteurs et complications administratives américaines liées à l'approvisionnement de l'uranium 235 aux États-Unis.

Dans le domaine des réacteurs de puissance, l'effort à venir sera essentiellement qualitatif en raison de l'actuelle abondance française de ressources conventionnelles, et sera orienté vers des prototypes appartenant à plusieurs voies différentes, celle des réacteurs refroidis au gaz comprimé et celle des réacteurs refroidis à l'eau. La priorité est donnée à la première qui comprend la filière suivie par l'Électricité de France : celle des réacteurs à uranium naturel-graphite-gaz comprimé. Le Commissariat à l'Énergie Atomique y est associé étroitement comme conseiller, de la même façon que l'Électricité de France fut associée au C. E. A. pour la production d'électricité à partir des piles de Marcoule du même type. Les deux premières centrales E. D. F. 1 et E. D. F. 2 [1] sont en cours d'achèvement près de Chinon dans le Val de Loire, elles seront d'une puissance électrique totale de plus de deux cent cinquante mille kilowatts, tandis que la centrale suivante E. D. F. 3 produira à elle seule près de quatre cent mille kilowatts. A l'inverse de la situation britannique, dans la construction de ces centrales, l'E. D. F. joue à la fois le rôle de maître de l'œuvre et d'architecte industriel, tandis que pour ses propres grandes unités le C. E. A. a toujours confié à d'importantes firmes privées la tâche d'architecte industriel, d'où l'avantage de les préparer au rôle qu'elles doivent jouer lorsqu'elles ont à affron-

1. Le prix du kilowattheure (haute tension) au niveau des prix de 1959 était de trois nouveaux centimes six dixièmes pour une centrale au charbon de deux cent cinquante mille kilowatts électriques amortie en trente ans. Les évaluations pour E. D. F. 2 sont de cinq nouveaux centimes le kilowattheure pour un amortissement en quinze ans et de quatre nouveaux centimes deux dixièmes pour un amortissement en trente ans.

ter la concurrence mondiale sur les marchés extérieurs.

Dans ce même domaine des réacteurs à uranium naturel refroidis par gaz comprimé, le C. E. A. envisage de mettre en chantier en 1962 pour l'Électricité de France, dans les monts d'Arrée en Bretagne, une pile de puissance, modérée cette fois à l'eau lourde. Ce réacteur prototype « EL 4 » est prévu pour une production d'électricité de l'ordre de soixante-dix mille kilowatts; les enseignements tirés de son fonctionnement vers 1966 devront permettre à l'Électricité de France d'avoir une filière de rechange et de choisir entre celle du graphite et celle de l'eau lourde pour l'utilisation de l'uranium naturel; l'emploi de l'eau lourde a l'avantage, pour un programme donné, de permettre de consommer moins d'uranium en l'utilisant plus à fond.

L'Électricité de France aborde également la filière des réacteurs à uranium enrichi-eau ordinaire, par la commande passée à l'industrie américaine, dans le cadre du programme U. S. A.-Euratom, de la centrale franco-belge de deux cent quarante mille kilowatts électriques prévue pour 1965 dans les Ardennes. Cette même filière est étudiée indépendamment par le C. E. A. dans le projet du prototype à terre du réacteur de sous-marin.

Tandis que l'industrie du graphite nucléaire est au point depuis plusieurs années en France et que celles des métaux spéciaux de gainage et de la fabrication des éléments de combustibles nucléaires sont très avancées, celle de l'eau lourde est encore en cours de création. Une usine pilote de distillation fractionnée de l'hydrogène liquide a fonctionné en 1960 pendant un an à Toulouse et produit quelques tonnes d'eau lourde, mais le procédé est trop délicat et coûteux pour être transposé à grande échelle et l'on envisage actuellement la construction d'une usine basée sur un procédé d'échange d'ammoniac et d'eau.

Tout ce développement, ayant principalement pour base de départ l'uranium naturel, serait incomplet si un effort important n'était engagé sur un des problèmes de l'énergie atomique non définitivement résolu, celui de la réutilisation future du plutonium produit dans les centrales, en particulier par la construction de réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs de plutonium, filière sans

doute la plus intéressante pour l'avenir [2]. C'est ainsi que le C. E. A. construit à Cadarache un premier réacteur expérimental au plutonium de cette catégorie, « Rapsodie » (à neutrons *rapides*, refroidi au *sodium*), qui sera achevé vers 1964 et pour lequel il s'associe à l'Euratom.

Toutes ces possibilités nécessitent de multiples réacteurs d'essai et de recherche. Le C. E. A. en dispose d'une dizaine déjà existants ou en cours d'achèvement; parmi ces derniers, le plus important sera « Pégase », un réacteur qui sera utilisé à Cadarache à partir de 1963 pour l'étude de la tenue des combustibles et de leur refroidissement par gaz sous pression.

Les relations internationales.

La France, quatrième puissance atomique mondiale, a continué pendant ces dernières années à développer un réseau de relations et de collaborations internationales, tant sur le plan bilatéral que sur celui des organismes multilatéraux. Ses établissements sont ouverts aux stagiaires étrangers, en particulier ceux de Grenoble et de Saclay. Ses experts participent à des missions d'assistance technique françaises ou internationales et ses industriels s'avancent dans le domaine étroit aujourd'hui, plus large demain, mais toujours difficile de la compétition internationale.

L'industrie nucléaire française concourt aux adjudications de construction de centrales étrangères comme celle en cours en Inde et celle dont la réalisation est envisagée au Brésil; elle pénètre dans le marché international nucléaire de l'électronique, des matériaux et combustibles et des laboratoires chauds, et fournit en particulier les trois mille tonnes de graphite de la centrale de puissance construite au Japon par l'industrie britannique.

Dans le domaine des matériaux nucléaires, la France est importatrice d'une part pour l'uranium enrichi acheté exceptionnellement au Royaume-Uni, mais principalement aux U. S. A. comme suite aux accords passés, civil

2. Un autre mode tout à fait distinct de réemploi du plutonium consistera à l'utiliser à la place d'uranium 235 dans les combustibles enrichis des réacteurs de type classique à modérateurs et à neutrons lents.

et militaire; d'autre part pour l'eau lourde achetée, pour des buts exclusivement civils aux U. S. A., et sans aucune restriction ni contrôle en Norvège. La France a été par contre exportatrice d'uranium vers la Suède et l'Inde, deux des pays avec lesquels sa collaboration date de près de dix ans, principalement dans le domaine de la métallurgie avec la Suède et des utilisations du béryllium métal et de son oxyde avec l'Inde. Dans le domaine des échanges d'information se situent des accords avec le Royaume-Uni, le Canada et les États-Unis, respectivement dans les voies de l'uranium naturel-graphite, de l'uranium-eau lourde et des réacteurs surgénérateurs. En plus, des accords cadres prévoyant le transfert de matériaux, l'échange d'informations, la formation des stagiaires ont été conclus avec la Suisse, la Yougoslavie, la Grèce et le Viet-nam, tandis que des relations suivies existent depuis plusieurs années avec l'Espagne, le Portugal, Israël, et plus récemment avec la Pologne et le Brésil.

Les relations avec les partenaires de la petite Europe se font encore bilatéralement plutôt que par le canal de l'Euratom et de sa machine administrative quelque peu complexe, en attendant qu'elles se développent avec plus d'efficacité sur le terrain technique dans les établissements du Centre commun de recherches d'Euratom et par le programme associé de recherches. C'est dans le cadre de ce programme commun que se fait, par suite d'un contrat d'association avec Euratom, une partie du financement des recherches sur la fusion contrôlée exécutées au centre de Fontenay-aux-Roses; il en sera sans doute de même dans l'avenir pour les travaux importants effectués à Cadarache. De telles associations amènent, en plus de leur contribution financière, des apports précieux de techniciens de valeur provenant des autres pays-membres de l'Euratom.

Les contacts techniques avec les pays européens autres que les Six se font principalement par le biais des entreprises communes de l'Agence européenne de l'Énergie nucléaire de l'O. E. C. E., tandis que dans le domaine de la recherche fondamentale portant sur les particules de haute énergie, les principales relations avec les pays européens sont établies grâce à l'accélérateur géant du

C. E. R. N. à Genève. Enfin, les contacts avec les pays de l'Est ont lieu à Vienne au sein de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, parallèlement à la mise en œuvre pratique de l'accord franco-soviétique d'échange de stagiaires de 1960.

La France fait directement, ou par l'intermédiaire de l'Agence Internationale, un effort en vue de l'assistance technique aux pays moins avancés dans les domaines de la prospection de l'uranium comme pour l'Iran, l'Afghanistan et la Turquie, de l'initiation aux applications des radioéléments artificiels à la médecine et à l'agriculture comme à Madagascar, au Sénégal et dans différents autres pays de la Communauté.

La France participe activement depuis 1946 aux principales négociations sur le désarmement atomique, dont le succès est une question vitale pour la civilisation; la possession de l'arme atomique ne peut que lui donner des responsabilités accrues dans cette négociation capitale.

Mais en l'absence d'un véritable désarmement nucléaire, l'objectif de la politique française est d'obtenir le statut d'allié atomique des États-Unis dont la communication des connaissances acquises lui permettrait alors, comme elle le permet aujourd'hui à la Grande-Bretagne, de disposer des armes nucléaires les plus perfectionnées sans avoir à faire l'épuisant effort de leur mise au point et de leur fabrication. Les progrès substantiels réalisés par la France dans le domaine de l'arme atomique, ainsi que sa capacité de production de matières fissiles, devraient lui donner gain de cause dans cette importante négociation à venir et dont le succès serait une des justifications de l'effort atomique français; celui-ci a pour objet de permettre à la France de participer pleinement à la grande entreprise de la fin de ce siècle, à la fois dans le domaine militaire où l'énergie atomique a déjà amené une révolution et dans celui de la production d'électricité où elle le fera probablement d'ici dix à quinze ans.

10.
L'avenir de l'énergie atomique.

Les facteurs qui, jusqu'à présent, ont permis d'établir la hiérarchie militaire des puissances : situation stratégique, potentiel industriel, nombre d'hommes, sont devenus sur l'échiquier mondial d'une importance secondaire par rapport à la possession ou la non-possession de l'arme atomique et des moyens de la faire parvenir à son but. Le potentiel nucléaire d'une nation est donc un des éléments caractéristiques de sa puissance internationale, et bien que le premier élément produit en quantité par l'alchimie moderne ne soit pas l'or, cet élément nouveau, le plutonium, est néanmoins déjà le signe de la force et de la richesse des États qui en possèdent. Aucune puissance moderne soucieuse de son indépendance ne peut se permettre d'être absente de la course à l'énergie nucléaire, complément trop coûteux aujourd'hui mais sans doute indispensable demain, de la production d'énergie à partir des sources classiques.

Il est donc très important d'essayer de prévoir l'évolution de l'affaire atomique sous tous ses aspects : politique, technique et économique, mais trop de facteurs interviennent pour qu'il soit possible de le faire sans grands risques d'erreur.

Le problème politique est évidemment le plus angoissant. Au fur et à mesure que les moyens de transport de l'arme se perfectionnent : fusées intercontinentales, fusées *Polaris* tirées sous la mer à partir d'un sous-marin et bientôt satellites spatiaux, on arrive à l'hallucinante idée qu'une guerre atomique pourrait être déclenchée sans que l'on sache quel est le pays agresseur. Le meurtre anonyme

pourrait donc être commis à l'échelle d'une nation. Cette notion qui tombe à peine sous le sens donne une idée de la révolution qui est en train de s'accomplir au fur et à mesure que le nombre de pays munis de ces armes augmente. L'objectif constant de la politique atomique américaine a été la limitation du nombre des pays possesseurs de l'arme atomique. Les États-Unis avaient espéré fermer la porte du Club, y rester dix à vingt ans seuls; ils le furent tout juste pendant quatre ans et en 1960, quinze ans après la fin de la guerre, la France devait être la quatrième puissance à commencer à y accéder. Quelques années ont séparé chaque accession nouvelle et chaque fois, les négociations sur le désarmement nucléaire ont repris en vain avec un partenaire de plus.

La matière de base de l'énergie atomique, l'uranium, s'étant révélée beaucoup plus répandue à la surface du globe que l'on ne le croyait en 1945, on peut dire que l'on ne l'espérait, aucun grand pays doté d'une industrie moderne ne peut en manquer s'il est décidé à le produire à partir de minerais très pauvres. La disparition progressive du secret permet à tout pays industriel, vraiment décidé à faire l'effort nécessaire, de fabriquer en quantité suffisante l'explosif. L'étape suivante de l'explosion de la bombe atomique en découle, puis, après quelques années d'un effort accru, celle de la bombe à hydrogène.

La Chine devrait maintenant suivre la France dans un délai difficile à prévoir, avant 1965 sans doute. Le pays qui donna au monde la poudre à canon ne peut renoncer à produire du plutonium comme défi à l'isolement où le maintiennent les puissances occidentales et à l'absence de véritable aide atomique militaire de la part de son allié d'aujourd'hui, l'Union Soviétique, sans doute demain sa rivale dans la direction du monde communiste. On ignore tout de ses travaux; ceux-ci ont certainement dû aboutir à la découverte de gisements d'uranium qui devraient permettre aux très nombreux techniciens chinois formés dans les universités soviétiques de donner d'ici peu d'années l'arme atomique à leur pays. Cette réalisation constituera un événement politique mondial de première grandeur, bouleversant l'équilibre international en faveur du pays qui craint le moins les consé-

quences d'un conflit nucléaire mondial en raison de l'importance de sa population, de son urbanisation et de son industrialisation peu avancées.

Au-delà de 1965 — car techniquement et industriellement la tâche est considérable — ce sera sans doute le tour de la Suède, puis de l'Inde qui, ne pouvant laisser la Chine dominer seule l'Asie de sa force nucléaire, abordera la production de l'arme bien que jusqu'ici le pandit Nehru y ait toujours été publiquement tout à fait hostile. A la même époque, l'Allemagne de l'Ouest et le Japon, auxquels les accords internationaux actuels interdisent toute activité militaire atomique, auront aussi atteint le potentiel nucléaire nécessaire à la fabrication de l'arme.

La qualité de ses équipes de techniciens, le degré d'indépendance de son effort, font en effet de la Suède un candidat au Club atomique. Elle pourrait y accéder vers le milieu de la présente décennie, dans le but d'avoir une défense munie des armes les plus modernes pour appuyer sa neutralité. La question d'un éventuel armement atomique, auquel est ouvertement favorable le commandant en chef des forces armées, est régulièrement débattue au parlement suédois, mais n'a pas été tranchée à ce jour, bien que la construction en cours d'une usine de traitement des schistes uranifères, donnant de l'uranium à un prix très supérieur au prix mondial, marque l'intention du pays d'élaborer une chaîne nationale indépendante de la mine d'uranium à l'usine de plutonium.

Par ailleurs, la Suisse, qui n'a jusqu'à présent trouvé que peu d'uranium sur son territoire, ne se pose pas moins le problème de l'armement atomique, sur le plan de l'obtention d'armes atomiques dans l'éventualité (bien improbable actuellement) où il pourrait en acquérir d'une autre nation sans enfreindre sa neutralité traditionnelle. Un plébiscite, tenu en mars 1962, a abouti au rejet, par deux tiers des votants, d'une proposition tendant à obtenir en Suisse l'interdiction de stockage, d'emploi et de fabrication d'armes atomiques.

En revanche, le Canada est à ce jour le seul pays qui, avec une production de plutonium suffisante (depuis plus de dix ans), ne s'est pas engagé dans un programme d'armes atomiques. Cette position, due sans aucun doute

à la protection qu'il reçoit de ses deux grands alliés anglo-saxons, lui permet d'être un ferme partisan de la cessation des explosions nucléaires, de la politique de l'aide contrôlée et de la fermeture du Club atomique dont il a été et est encore pour quelques années un des grands fournisseurs d'uranium.

Pour l'instant, la règle non écrite du Club interdit à un pays-membre d'aider un pays non membre à y accéder, et la législation américaine exige la carte de membre du Club avant d'autoriser une aide en cette matière explosive. Mais en sera-t-il toujours ainsi? Si l'aide devient coutumière, de l'aide à la cession des bombes il n'y a qu'un pas. L'accroissement du nombre des membres du Club, par ceux à qui on aura fourni la cotisation d'entrée, rendra le spectre de la guerre atomique anonyme encore moins improbable et le problème du désarmement nucléaire encore plus difficile à résoudre.

La politique de l'aide contrôlée n'est qu'un palliatif temporaire et peu efficace à cette évolution, car en l'absence d'un contrôle véritablement mondial de l'aspect pacifique du développement de l'énergie atomique, il est probable que les tentatives d'imposition de contrôle par les pays avancés aux pays moins avancés seront toujours vouées à terme à des échecs, si même pendant quelque temps elles réussissent, ce qui n'est pas négligeable, à ralentir l'accession de nouveaux membres au Club des possesseurs d'armes atomiques.

Le gouvernement américain va continuer à favoriser l'exportation des centrales à uranium enrichi, à la fois intéressante pour son industrie et pour sa politique de contrôle car le combustible devra forcément provenir des États-Unis qui vont longtemps garder un quasi-monopole de la vente de l'uranium 235. Par contre, il va sûrement devenir de plus en plus difficile d'amener les pays acheteurs de centrales à uranium naturel, comme l'Inde, à accepter des contrôles d'utilisation pacifique; cette réticence découle de l'abondance de l'uranium naturel et de la possibilité pour un pays relativement industrialisé, soit de construire lui-même un tel réacteur en en commandant les divers organes à l'étranger, sans condition de contrôle, soit de réaliser une réplique libre de toute restriction

d'emploi d'un réacteur importé et soumis à contrôle.

La compétition entre producteurs d'uranium, en particulier ceux d'Afrique du Sud et du Canada, privés dans l'avenir de leur débouché américain, les nouvelles découvertes minières qui seront faites très probablement dans d'autres pays vont inévitablement provoquer l'introduction d'une certaine liberté dans le commerce de l'uranium, au détriment de la politique anglo-saxonne de l'aide contrôlée. Il est ainsi difficile de prévoir l'avenir d'une telle politique en présence de la concurrence accrue entre industriels des pays avancés démunis de marchés extérieurs et le désir d'indépendance des pays moins développés. Ceux-ci, tout en ne souhaitant pas pour l'instant devenir membres du Club atomique, ne veulent pas s'en fermer dès maintenant l'accès et répugnent à voir une branche de leur production d'énergie inspectée par un groupe de grandes puissances qui, de leur côté, ne sont pas prêtes à accepter de contrôle pour leurs propres centrales nucléaires.

Les contraintes politiques liées à l'énergie atomique continueront donc dans l'avenir à influencer le déroulement des programmes civils : ainsi, à conditions économiques égales, deux pays pourraient adopter des solutions différentes, l'un disposant de combustible nucléaire libre s'engagerait dans la voie de l'électrification nucléaire, l'autre dépourvu d'uranium préférerait la voie conventionnelle et des importations de combustibles classiques exempts de contrôles politiques. De même, un pays disposant de matériaux nucléaires exempts de restriction d'emploi, plutôt que de s'engager dans un programme conventionnel d'électrification, pourrait préférer la construction plus coûteuse de centrales électriques nucléaires dans le but de se doter des moyens industriels lui permettant de s'engager dans un programme d'armement atomique le jour où les circonstances extérieures pourraient l'imposer.

En l'absence d'un désarmement nucléaire mondial, l'augmentation probable du nombre de pays engagés dans un programme d'armement atomique provoquera ainsi dans le monde une expansion industrielle qui favorisera indirectement les progrès des applications bénéfiques de l'énergie atomique tant l'imbrication du civil

et du militaire est profonde. Mais la mise en route d'un véritable programme de désarmement universel aurait aussi des conséquences favorables sur l'industrie atomique civile par la démilitarisation des grands stocks de matières fissiles et des usines de production correspondantes rendues ainsi disponibles. Un autre phénomène pourrait jouer dans le même sens : le ralentissement des principaux programmes d'armements atomiques le jour où les grandes puissances auront atteint la saturation de leurs réserves militaires. Une telle saturation pourrait se produire d'ici quelques années pour les U. S. A. comme pour l'U. R. S. S., qui auraient alors en stock plusieurs fois la quantité d'armes nécessaires pour réduire à néant tous les grands objectifs militaires du globe.

Ce dernier facteur, comme celui lié à la découverte possible de nouveaux gisements importants d'uranium, rend d'autant plus difficile à prédire la date à laquelle les réserves canadiennes et sud-africaines d'uranium pourront être à nouveau normalement exploitées, que l'on est réduit également à des hypothèses sur la date et le rythme de la reprise de la consommation d'uranium provoquée par le développement à l'échelle mondiale de la production d'électricité d'origine nucléaire. L'uranium est donc appelé à se maintenir à des prix bas jusqu'au jour où les frais correspondant à la remise en exploitation des mines abandonnées entraîneront une remontée des prix vers des niveaux comparables à ceux des années d'euphorie.

Il en résulte que, dans le proche futur, tant que les besoins de l'utilisation industrielle de l'énergie atomique n'auront pas atteint à l'échelle mondiale un ordre de grandeur supérieur à celui de la consommation des programmes militaires, l'économie des matériaux nucléaires et de ce fait, dans une certaine mesure, le coût de l'électricité en dérivant, dépendront en partie de facteurs principalement politiques.

Mais il n'en reste pas moins que cette dépendance du civil par rapport au militaire, pour complexe et gênante qu'elle soit, a considérablement favorisé dans le passé le développement des programmes civils, car, sans les applications de guerre, l'industrie des matériaux nucléaires n'aurait jamais été bâtie avec une telle amplitude et une

si grande rapidité; de grandes réserves de ces matériaux n'auraient pas été accumulées et enfin les bas prix liés aux larges productions, impensables pour les seuls buts civils actuels, n'auraient jamais été atteints.

L'évolution de la technique nucléaire dans les années à venir est aussi difficile à prévoir que le futur de la politique atomique internationale.

Le bruit qui avait été fait en 1958 autour de l'hypothétique utilisation de la fusion des éléments légers pour la production contrôlée d'énergie avait fait croire que l'uranium était déjà dépassé et que l'hydrogène de toute l'eau du globe serait prochainement à la disposition de l'homme comme source illimitée d'énergie obtenue par le processus mis en jeu dans la bombe à hydrogène.

Il n'en a rien été; les travaux de laboratoire sur la fusion sont encore à leurs balbutiements et nécessitent le défrichement préalable de toute une branche nouvelle et passionnante de la science, « la physique des plasmas », c'est-à-dire des gaz ionisés; celle-ci a déjà permis d'atteindre au laboratoire des températures beaucoup plus élevées que celles produites antérieurement. Ces recherches auront sûrement d'ici quelques années des applications pratiques, mais nul ne peut dire aujourd'hui si ce sera dans le domaine de la production d'énergie. Dans le cas encore tout à fait incertain où l'on arriverait à réaliser au laboratoire la réaction de fusion contrôlée, il faudrait, comme pour la fission de l'uranium, plusieurs dizaines d'années et peut-être beaucoup plus, pour savoir si cette nouvelle source hypothétique pourrait ou non devenir concurrentielle. Sa mise en jeu aurait l'avantage de ne pas produire de sous-produits radioactifs mais impliquerait des machines complexes, des matériaux nouveaux et des problèmes de protection contre les rayonnements émis au cours de la réaction; le prix en serait donc régi, comme pour l'énergie de fission, par celui des installations et non celui des combustibles bon marché.

Pour la fission, au contraire, les problèmes techniques de mise en œuvre industrielle ont déjà des solutions valables, laissant encore place évidemment à des progrès

certains, mais sans doute pas de caractère révolutionnaire. Toutefois de grands bouleversements pourraient résulter d'une découverte d'un nouveau procédé de séparation isotopique qui rendrait plus faciles et plus économiques les productions de l'eau lourde et surtout de l'uranium 235.

Dans le cas de l'uranium 235, un premier progrès consisterait à mettre au point un procédé qui permettrait d'effectuer à un prix raisonnable la séparation des isotopes à l'échelle de la dizaine de tonnes d'uranium, car le procédé de diffusion gazeuse ne peut s'opérer avec une économie convenable que dans d'immenses usines de capacité minimum de quelques centaines de tonnes d'uranium traitées par an. Des études sont effectivement poursuivies dans des voies nouvelles dont la plus prometteuse met en jeu l'ultra-centrifugation de l'hexafluorure d'uranium.

Il n'est pas impossible que dans quelques années une installation d'ultra-centrifugation coûtant au total quelques dizaines de millions de nouveaux francs permette, à partir de seulement dix tonnes d'uranium naturel, d'extraire les vingt kilos d'uranium 235 nécessaires à une bombe. La mise au point d'un tel nouveau procédé de séparation isotopique pourrait rendre encore plus difficiles les tentatives politiques de contrôle de l'utilisation pacifique de l'uranium; car un tel progrès technique mettrait la fabrication de l'arme à la portée de plusieurs nouvelles puissances, à partir d'une installation difficilement décelable et d'une quantité d'uranium si peu significative par rapport aux usines militaires actuelles qu'elle est susceptible d'être vendue sans restriction d'emploi, selon les règles en cours de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique. Ce fait montre la fragilité d'un système de contrôle puisque son efficacité peut être totalement remise en question dans le cas où se produirait un brusque progrès technique.

Un progrès plus radical, donnant de l'uranium 235 bien meilleur marché que le produit américain, aurait, en plus des conséquences politiques précédentes, des répercussions considérables sur l'utilisation industrielle de l'énergie atomique en faisant pencher la balance en faveur des centrales à uranium enrichi [1].

1. Le prix de l'uranium 235 américain a été ramené en 1961 à treize dollars le gramme, soit une baisse de 30 % environ, pour

Du point de vue économique, il n'est pas possible de trancher aujourd'hui entre les multiples types de centrales envisagées, ni même entre la voie de l'uranium naturel et celle de l'uranium enrichi qui toutes les deux produisent de l'électricité à des prix d'autant plus bas pour un genre de réacteur déterminé que sa puissance est plus grande. Pour les centrales à uranium enrichi, le ralentissement de ces dernières années se manifestera entre 1963 et 1966 par l'absence de mise en fonctionnement de nouvelles unités durant ces années. Les prochaines centrales américaines à être mises en chantier seront plus puissantes que les précédentes, de plus de trois cent mille kilowatts électriques chacune et constituées d'un seul réacteur respectivement à eau bouillante et à eau pressurisée; leur construction devrait débuter en 1962 sur la côte Ouest des U. S. A. La première déjà décidée sera réalisée aux seuls frais de l'industrie privée; la seconde doit bénéficier d'une subvention gouvernementale importante mais a son sort lié à l'attribution d'un site dont la marine refuse de se dessaisir.

Les États-Unis devraient donc avant 1970 avoir réussi à définir les meilleures conditions d'exploitation de l'uranium enrichi à partir d'une expérience de plus de dix ans sur les réacteurs de la flotte nucléaire, de quelque sept ans sur les centrales en fonctionnement ou en cours d'achèvement, et de deux ou trois ans sur les plus grandes unités à venir.

Les mises en marche en France et en Angleterre de centrales de puissances croissantes à uranium naturel (modérées au graphite et refroidies au gaz comprimé) vont s'échelonner régulièrement pendant les prochaines années. L'expérience de fonctionnement de ces premières unités décidera du succès de la voie suivie qui devrait déjà permettre d'atteindre un prix compétitif d'ici cinq à sept ans environ. Le pari anglais de 1955 a certainement correspondu à un démarrage un peu prématuré dans la course à l'énergie nucléaire. Les premières centrales nucléaires britanniques produiront de

suivre celle des cours mondiaux de l'uranium, afin de contrecarrer l'avantage dont auraient bénéficié les centrales à uranium naturel françaises, britanniques et canadiennes.

l'électricité à un prix compris entre cinq et quatre centimes le kilowattheure au lieu de trois et demi estimés initialement, tandis que le coût prévu pour la production des prochaines grandes centrales thermiques au charbon est en baisse de trois centimes et demi à trois centimes, en partie, semble-t-il, à la suite des progrès industriels réalisés sous la crainte de la concurrence nucléaire qui joue ainsi déjà un rôle appréciable. Il est probable qu'avant 1970 l'écart des prix sera presque entièrement comblé, et l'Angleterre, qui ne possède pas de sources d'énergie hydraulique, aura ajouté un troisième combustible, l'uranium, aux deux dont elle dispose pour faire face à ses besoins, le charbon et le pétrole.

Malgré le ralentissement actuel, l'ensemble des programmes de production d'électricité d'origine nucléaire devrait aboutir à l'installation d'une capacité d'une dizaine de milliers de kilowatts électriques avant 1970, soit environ 1 % de la production d'électricité mondiale prévue pour cette date. De cette capacité, la moitié est déjà assurée et correspond à une trentaine de centrales existantes, en construction ou en commande ferme, à achever avant 1966 et réparties entre le Royaume-Uni pour plus du tiers, les États-Unis, l'Union Soviétique, la France, l'Italie et le Japon pour le reste.

Il faudra sans doute attendre la fin de la décennie actuelle pour connaître le résultat de la compétition entre l'uranium naturel et l'uranium enrichi; il est possible que la solution de l'avenir soit une sorte de compromis entre les deux voies découlant de la mise en œuvre de l'uranium légèrement enrichi. Les prévisions actuelles permettent déjà d'espérer que par la construction de centrales de plus en plus puissantes et perfectionnées, il sera possible d'ici dix ans et pour chacune de ces filières de produire de l'électricité au prix de trois centimes environ le kilowattheure, à partir de centrales de trois cent mille kilowatts [2] dont le prix de construction sera

2. Pour de telles centrales, les charges financières interviendraient pour 55 % à 65 % du prix du kilowattheure, le combustible pour 20 % à 30 % et les frais d'exploitation pour 15 %. Il est intéressant de comparer ces chiffres à ceux correspondants pour le kilowattheure thermique en France qui sont

de l'ordre de cinq cent millions de nouveaux francs chacune et qui pourront alimenter en électricité une ville moderne d'un demi-million d'habitants.

Ces grandes centrales nucléaires, du fait du coût élevé de l'investissement et du prix relativement faible du combustible, se rapprochent économiquement des installations hydrauliques et devront fonctionner avec un grand facteur de charge, c'est-à-dire d'utilisation, comme le font les centrales hydrauliques au fil de l'eau, l'amortissement du capital représentant un facteur important du prix du kilowattheure. Les besoins de pointe pourront être alors satisfaits par des centrales thermiques.

Les calculs relatifs à l'économie des réacteurs et au prix du kilowattheure nucléaire font encore l'objet de nombreuses controverses en raison du manque d'expérience industrielle due en particulier aux incertitudes sur la fraction d'uranium utilisable, sur la durée de vie réelle des centrales, et sur l'évaluation exacte des risques de détérioration du réacteur, soit à la suite d'une fausse manœuvre, soit en raison de l'effet des radiations sur les parties les plus exposées à leur action.

Avant même que la solution de la surgénération soit mise en jeu sur une grande échelle dans des réacteurs spéciaux (permettant l'utilisation d'une fraction importante de l'uranium 238 ou du thorium), et en supposant que l'on puisse au moins utiliser par fission 1 % de l'uranium, ce qui est une hypothèse conservatrice, les quelques quarante à cinquante mille tonnes d'uranium extraites annuellement dans le monde pourraient fournir environ autant d'énergie que la moitié de la production annuelle mondiale actuelle de charbon d'environ deux milliards de tonnes.

Quinze années de prospection d'uranium dans un nombre relativement limité de pays ont permis de déceler l'existence d'environ un million et demi de tonnes d'uranium dans le monde occidental, dont les réserves probables peuvent être évaluées à quatre ou à cinq millions de tonnes. Ces réserves sont suffisantes pour que le monde entier puisse améliorer son niveau de vie pendant des dizaines

respectivement de 20 %, 73 %, 7 % pour les charges financières, le combustible et les frais d'exploitation.

d'années, et peut-être même pendant plusieurs siècles. Ces réserves pourraient d'ailleurs être complétées par des minerais moins riches et plus coûteux à traiter chimiquement, comme les schistes bitumineux américains et suédois, ou les phosphates naturels de chaux américains, marocains et israéliens. A celles-ci pourraient s'ajouter, si cela s'avérait nécessaire, les réserves mondiales de thorium, sans doute de l'ordre de quelques millions de tonnes, l'Inde en possédant à elle seule près d'un demi-million de tonnes sur les côtes du Travancore dans des sables « monazites » qui se trouvent aussi au Brésil et à Madagascar.

Il n'y a donc pas de problème de matières premières, mais pour que les pays industrialisés se lancent effectivement dans de larges programmes d'électrification nucléaire purement civils, il faudra que ceux-ci y trouvent un avantage économique et parfois politique suffisant. Mais il faudra aussi, le point est capital, avoir résolu les difficultés liées à l'angoisse croissante du grand public en face des dangers de la radioactivité. Il faut espérer que les difficultés d'ordre psychologique rencontrées actuellement s'estomperont en partie au fur et à mesure d'une éducation des masses leur permettant d'évaluer par elles-mêmes l'importance réelle des risques encourus; l'histoire des grandes inventions passées comme celle des chemins de fer est rassurante sur ce point. L'absence d'accident nucléaire grave d'ici cinq à dix ans permettra de réduire les craintes du public et de traiter de façon satisfaisante le problème complexe des assurances. Au contraire, un tel accident, s'il survenait, pourrait porter un coup sensible au rythme de développement de l'industrie nucléaire civile dans le monde. Il n'en reste pas moins qu'il est difficile d'estimer aujourd'hui les dépenses qui seront nécessaires pour donner aux populations le degré de sécurité exigible, aussi bien du point de vue technique que de celui de la localisation géographique, pour les réacteurs, les usines de traitement de combustibles irradiés et le stockage des déchets radioactifs.

Dès maintenant, la production d'électricité d'origine nucléaire se justifie dans certaines situations géographiques spéciales. Par contre, il semble qu'en l'absence de pénurie de ressources conventionnelles : (pénurie à

laquelle on a cru en 1957 et qui a engendré la politique vite abandonnée de l'énergie nucléaire à n'importe quel prix), l'énergie nucléaire à des fins purement civiles devra avoir atteint, dans sa courbe de prix descendante, un niveau légèrement inférieur à celui du prix de l'énergie d'origine conventionnelle pour qu'il vaille la peine d'affronter les écueils politiques et techniques qui en sont la rançon.

Il est difficile de savoir si la baisse actuelle du prix de l'électricité d'origine conventionnelle n'est qu'une fluctuation sur une courbe de prix croissants. Cette baisse pourrait être assez durable car elle résulte à la fois de progrès techniques et de la diminution du prix des matières premières, dont le dumping croissant du pétrole soviétique sur les marchés occidentaux n'est qu'une des causes. Une baisse du prix du transport du charbon pourrait découler d'une généralisation de l'emploi de pipe-lines charriant une boue de charbon et d'eau actuellement à l'étude aux États-Unis. La construction en série d'un modèle unique de centrales thermiques, également envisagée aux U. S. A., serait un autre facteur de réduction du prix du kilowatt installé.

Il n'en reste pas moins que les besoins croissants d'énergie dans le monde et l'épuisement progressif des ressources classiques devraient à nouveau, dans un avenir proche, conduire à une lente augmentation du prix de l'énergie d'origine conventionnelle, parallèlement à la diminution constante du prix de l'électricité d'origine nucléaire au fur et à mesure des progrès de la technique. Les deux courbes devront donc se rencontrer et l'on peut en conclure que l'énergie extraite de l'uranium a toutes chances de jouer un rôle important dans l'équilibre énergétique mondial avant la fin du siècle, mais à une date difficile à préciser. Chaque puissance intéressée doit, comme la France cherche à le faire, préparer son industrie à prendre le tournant atomique en évitant de le faire trop tôt ou trop tard. Les nombreuses inconnues, politiques et techniques, empêchent de prévoir avec certitude s'il y aura un développement massif de l'énergie atomique industrielle dans le monde dans dix ou dans quinze ans. Cette révolution atomique industrielle aura sans doute lieu vers les années 1970-1980 et apparaît en tout cas suffisamment probable

pour justifier les investissements considérables qui sont faits en sa faveur en marge des programmes militaires. Il est probable que cette évolution s'accompagnera d'une transformation progressive des grands organismes exceptionnels qui ont été créés, en particulier au Royaume-Uni et en France, pour présider au développement accéléré des applications tant militaires que civiles de l'énergie atomique. L'étape des prototypes étant alors révolue, les grands services utilisateurs, l'armée et l'industrie électrique, souhaiteront rester maîtres des crédits affectés aux réalisations nucléaires et aux recherches appliquées qui leur sont liées. Les différentes activités des organismes atomiques pourraient alors être progressivement réparties entre les services nationaux responsables de la défense, de la production d'électricité et de la recherche scientifique pure et appliquée. Une direction responsable de la production des matières fissiles pourrait subsister indépendamment pour l'alimentation des besoins civils et militaires.

L'Autorité de l'Énergie Atomique du Royaume-Uni sera sans doute la première grande commission atomique à subir cette évolution; celle-ci toucherait l'affectation d'une fraction du personnel, en particulier celui du groupe industriel de l'Autorité, dont le rôle tend à diminuer au fur et à mesure de la reprise des constructions de centrales par l'industrie privée. Des transformations analogues pourraient, quelques années plus tard, affecter le Commissariat à l'Énergie Atomique français au profit de l'Électricité de France et de la direction des fabrications d'armements du ministère des Armées. Il faudra aussi résoudre le problème posé par l'existence des grands laboratoires de recherches polyvalentes de plusieurs milliers de travailleurs comme ceux d'Oak-Ridge, de Harwell et de Saclay. Leurs tâches sont peu à peu reprises par l'industrie, véritable responsable pratique du développement des centrales nucléaires. Ces laboratoires, admirablement équipés pour les disciplines scientifiques les plus variées, pourraient progressivement être affectés à des problèmes d'importance nationale, distincts de l'énergie atomique, comme par exemple les grandes questions biologiques. Cette question a été débattue au laboratoire d'Oak-Ridge qui a proposé au gouvernement américain

de consacrer une partie de ses effectifs à une étude d'ensemble sur le vaste problème de l'approvisionnement en eau des États-Unis.

L'introduction massive de la production d'électricité d'origine nucléaire se fera d'abord dans les pays fortement industrialisés dont la consommation électrique croît sans cesse (doublant en général tous les dix ans à l'époque actuelle), et seulement plus tard dans les pays moins développés auxquels on a eu tort de faire croire que l'énergie atomique allait leur permettre de rattraper en un bond leur retard. En effet, pour ces derniers pays, une élévation du niveau général de vie, d'éducation et de consommation d'énergie devra précéder l'introduction d'une technique d'un maniement aussi délicat que celle des réacteurs nucléaires.

Par ailleurs, les zones sous-développées du globe disposent en général de sources importantes d'énergie classique à exploiter. C'est le cas des régions peuplées où la vie se concentre autour des grands fleuves qui sont des réservoirs d'énergie potentielle considérables et dont l'équipement aura, pour des pays comme le Brésil par exemple, l'avantage de n'entraîner que de relativement faibles dépenses en devises étrangères. De même, les zones désertiques peu peuplées, comme celles d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, sont souvent des déserts où se trouve, sous leur sable, du pétrole en abondance. De plus, les petites centrales atomiques qui conviendraient à un pays en voie de développement donnent de l'électricité à des prix élevés et jusqu'à présent, les études économiques faites par divers organismes internationaux compétents n'ont pas encore trouvé dans de tels pays de situation géographique relevant de l'énergie nucléaire plutôt que de sources conventionnelles. Une exception doit être faite pour les régions particulièrement industrialisées de zones peu développées, où l'installation d'une grande centrale nucléaire peut se justifier; c'est le cas de la région de Bombay pour laquelle une centrale nucléaire de trois cent mille kilowatts électriques trouve sa place dans le plan d'électrification de l'Inde.

Toutefois, le fait que cette nouvelle source d'énergie n'est pratiquement liée à aucune contingence géogra-

phique, en raison du poids relativement faible du combustible mis en œuvre, lui donne une remarquable souplesse et, en particulier, lui permettra d'être développée dans des régions désertiques ou polaires du globe, dans les cas très exceptionnels où le besoin s'en ferait sentir; ces cas se limitent à des applications militaires et scientifiques : alimentation en électricité de la ligne de radars du Nord du Canada, ou des bases américaines de l'Alaska, du Groenland et de l'Antarctique. On a aussi envisagé l'installation de petites centrales nucléaires pour la fourniture d'électricité à des exploitations minières situées dans des zones relativement inaccessibles pour le transport des combustibles classiques : mines de diamants au nord de la Sibérie, gisements de cuivre en Afrique centrale.

Les réacteurs nucléaires pourront probablement avoir aussi des usages autres que celui de la production d'électricité, comme par exemple la production directe de vapeur pour la distillation de l'eau de mer, pour le chauffage urbain ou pour une industrie qui en consomme largement, comme celle de la pâte à papier. Par ailleurs, l'utilisation des sources intenses de rayonnement, sous-produits du fonctionnement des réacteurs, est appelée à avoir un grand avenir dans de nombreux domaines : en particulier la stérilisation, dans les cas où la chaleur n'est pas utilisable, et les réactions et synthèses chimiques. On aboutira peut-être à la construction de réacteurs nucléaires dans le seul but d'utiliser leurs radiations à de telles opérations chimiques. Mais c'est aussi du côté de la propulsion nucléaire que vont s'ouvrir progressivement de nouveaux horizons.

L'étonnante concentration de l'énergie dans la matière fissile n'est pas, en général, le facteur marquant dans la production d'énergie ou d'électricité d'origine nucléaire à partir de centrales fixes. Au contraire, ce facteur est l'élément dominant dans la propulsion nucléaire, il s'y ajoute souvent aussi l'avantage de l'indépendance de la combustion nucléaire par rapport à l'oxygène. L'éclatante réussite du sous-marin nucléaire est due à ces deux facteurs; l'un d'eux, la suppression de la servitude des ravitaillements fréquents en combustible classique, inter-

viendra aussi pour les bateaux de guerre de surface, pour autant que la marine de guerre nucléaire sous-marine n'en condamnera pas finalement l'usage. Il est difficile de prédire si dans quelques années les grandes puissances atomiques, comme les U. S. A. et le Royaume-Uni, limiteront ou non leur programme de construction navale aux seules unités nucléaires.

Sauf dans un cas exceptionnel comme celui du brise-glace soviétique, la suppression des ravitaillements en combustible est beaucoup moins avantageuse pour la marine marchande pour laquelle le passage au combustible nucléaire ne se justifierait que par des avantages économiques. Ces avantages n'apparaissent pas au stade actuel, la propulsion nucléaire est encore trop coûteuse, le danger des collisions, le risque éventuel de contamination radioactive lors des escales dans les ports, sont des difficultés que l'on envisage pourtant de surmonter, en particulier dans le cas des grands navires pétroliers ou, de préférence, de grands transporteurs de minerais exempts du risque d'incendie qui menace les précédents. Le faible volume du combustible nucléaire permettrait certainement de gagner de la place à bord et du temps aux points de chargement et de déchargement. On a aussi envisagé la construction de grands sous-marins atomiques pour la marine marchande, pour effectuer des liaisons directes Amérique du Nord-Europe par passage sous la calotte polaire.

Malgré la décision américaine de construire un navire marchand de prestige, dont les premiers essais seront effectués en 1962, l'Autorité de l'Énergie Atomique britannique a déconseillé à son gouvernement de se lancer actuellement dans un programme de propulsion nucléaire de marine marchande; le Commissariat à l'Énergie Atomique en a fait de même en France. Toutefois, de nombreux pays européens étudient indépendamment ces problèmes, déjà prestigieux, mais loin d'être encore économiquement compétitifs. Il a paru raisonnable d'essayer d'associer ces efforts, jugés prématurés par les uns, justifiés par les autres, et l'Agence Européenne de l'Énergie Nucléaire de l'O. C. D. E. étudie les questions complexes que poserait la création d'une entreprise commune, non

commerciale, comme par exemple un bateau océanographique mû par un moteur nucléaire.

Il semble donc raisonnable de prévoir que le développement de la production d'électricité d'origine nucléaire précédera celui de la navigation marchande nucléaire, dont il est difficile de préciser dans quelles conditions elle pourrait devenir concurrentielle. Néanmoins, il est probable que des considérations de prestige national entraîneront dans les années à venir la construction de quelques unités qui pourront servir de banc d'essai aux problèmes posés par ce nouveau mode de propulsion. Mais il est caractéristique qu'en dehors des deux navires marchands soviétique et américain et des trois bateaux de guerre américains aucun navire nucléaire de surface n'a été mis en chantier dans le monde depuis 1957.

La propulsion nucléaire ne sera jamais utilisable pour les automobiles en raison du poids des éléments de blindage assurant la protection nécessaire contre les radiations, mais elle pourrait l'être pour les grands avions, et l'étude en a été faite, puis abandonnée, aux U. S. A. et semble se poursuivre en U. R. S. S., mais ici encore en vue des avantages militaires présentés par des avions libérés des nécessités de reprises de carburant. Mais la redoutable contamination radioactive qui résulterait immanquablement de tout accident est susceptible de faire obstacle à l'utilisation commerciale d'une éventuelle aviation nucléaire. Par contre, l'extraordinaire concentration des sources d'énergie nucléaire rend tout indiqué dans l'avenir l'emploi de celles-ci dans le domaine de la navigation spatiale, où une véritable autonomie de vol a beaucoup plus de chances d'être obtenue à partir de combustibles nucléaires qu'à partir de combustibles chimiques infiniment plus lourds.

Deux champs distincts d'applications se présentent, suivant que la fourniture d'énergie est destinée à provoquer l'envol de la fusée ou à alimenter en électricité le mobile déjà en vol.

Le premier problème est de beaucoup le plus difficile, à l'étude aux U. S. A. comme en U. R. S. S., il nécessitera des années d'effort considérable avant d'être résolu. Une série de réacteurs à haute température et à combustion

rapide est envisagée aux États-Unis, un premier modèle est à l'étude qui met en jeu de l'hydrogène comme fluide de refroidissement, celui-ci initialement comprimé sera chauffé dans le réacteur puis détendu dans une tuyère créant ainsi la force de propulsion.

La deuxième application est déjà en partie résolue, elle a pour but de réaliser une fourniture durable d'électricité à bord du mobile, en particulier pour la transmission des informations scientifiques. Une première solution est basée sur la chaleur provoquée par la désintégration de sources intenses de radioéléments à vie longue pour produire de l'électricité au moyen de convertisseurs thermo-électriques. Elle a été mise en pratique en 1961 sur les deux satellites américains *Transit-IV* dont les signaux sont destinés à la navigation, il s'agit d'un ensemble basé sur l'emploi de l'isotope 238 du plutonium (période quatre-vingt-dix ans) fournissant en continu trois watts environ d'électricité, et pesant deux kilos seulement; le poids relativement léger de ce petit moteur[3] en compense le coût élevé. La deuxième solution à l'étude est liée à la réalisation de petits réacteurs nucléaires compacts pesant une centaine de kilogrammes, à combustible très enrichi et haute température, producteur de quelques milliers de watts d'électricité. Un tel réacteur pourrait être utilisé pour fournir les impulsions nécessaires à changer en vol l'orientation et la vitesse de la fusée, en particulier en utilisant la technique nouvelle du moteur ionique : celle-ci consiste à créer des champs d'accélération dans lesquels des gaz ionisés (analogues aux plasmas étudiés dans la fusion) sont accélérés à des vitesses considérables avec création de la force de réaction nécessaire à la propulsion.

Enfin, l'avenir montrera aussi le degré de validité des projets américains d'utilisation d'explosions nucléaires pour certains grands travaux : création de ports artificiels, de grands canaux, élimination d'une couche superficielle de terrain recouvrant un gisement de minerai, obtention d'une pression et d'un échauffement pour concentrer le

3. Un générateur d'électricité analogue d'environ cinq watts, basé sur l'isotope 90 du strontium, a été mis en marche en 1961 pour l'alimentation électrique d'une station météorologique américaine automatique au pôle Nord.

pétrole contenu dans des schistes et en permettre l'extraction, et enfin, récupération de la chaleur d'une explosion contenue dont l'énergie serait utilisée par la formation de vapeur. Ces projets sont assez discutés, ils ne pourraient voir le jour que si les difficultés dues aux sous-produits radioactifs arrivent à être compensées par l'avantage économique d'explosifs nucléaires bon marché et puissants.

De tels projets comme ceux de la propulsion nucléaire spatiale ne pourront aboutir avant quelque cinq ou dix ans; leur caractère futuriste justifierait qu'ils fussent l'objet d'une action concertée internationale, car la leçon des nombreuses tentatives de collaborations multilatérales atomiques montre que celles-ci, malgré leurs tâtonnements initiaux, peuvent avoir une action utile, en particulier dans la mise sur pied d'entreprises communes pour des projets très coûteux à long terme dépourvus d'intérêts industriels immédiats. Les études sur la fusion contrôlée se rattachent aussi à cette catégorie de projets, les perspectives de leur aboutissement sont encore trop lointaines pour inciter à diminuer l'effort de mise en œuvre de l'énergie de fission, qui seule peut être envisagée comme moyen de suppléer d'ici dix à vingt ans aux insuffisances de sources classiques; elles peuvent seulement tranquilliser sur l'avenir d'une humanité qui aurait su dominer les problèmes politiques de l'atome en mettant à sa disposition une nouvelle source illimitée d'énergie lui permettant de dissiper sans restriction, en quelques siècles, tous les gisements d'uranium du globe.

Ainsi, malgré les progrès considérables réalisés à ce jour sur la production industrielle de l'électricité d'origine nucléaire, il est impossible aujourd'hui, en raison de l'évolution trop rapide de la technique moderne, de prévoir si la satisfaction des besoins en énergie du XXIe siècle se fera principalement à partir des combustibles classiques, ou de l'uranium extrait de l'écorce terrestre, ou de l'hydrogène de l'eau du globe, ou de l'énergie solaire, ou enfin de tout autre processus inconnu encore à ce jour.

Ainsi se déroule depuis vingt ans la ronde des images du kaléidoscope des problèmes atomiques, politiques ou techniques, depuis l'infiniment petit de la matière jusqu'à l'infiniment grand de la destruction, en passant par la forme la plus concentrée de l'énergie.

A partir d'une base surabondante de matériaux, la technologie nucléaire progresse, poussée par le prestige, freinée par les craintes des dangers des radiations ou les difficultés politiques résultant de l'imbrication inévitable du civil et du militaire. Dans dix ou vingt ans, des machines plus simples et plus économiques seront prêtes, s'il y a lieu, à fournir de grands apports d'électricité à un monde de plus en plus industrialisé.

Mais si les questions techniques les plus délicates reçoivent de nos jours rapidement des solutions, il n'en est pas de même des problèmes humains, moraux et politiques, et le problème auquel notre génération doit faire face est bien plus de résoudre le dilemme posé par l'existence de l'arme atomique que de mettre à profit l'énergie nucléaire.

La grande caractéristique du problème atomique est que, par bien des côtés, il échappe à l'appréciation de l'homme. Les problèmes qu'il soulève, les ordres de grandeurs qui le caractérisent, les conséquences auxquelles il pourrait aboutir ne sont plus à l'échelle humaine. Les solutions proposées à ce jour s'en ressentent, qu'il s'agisse du secret atomique qui n'a pas résisté au progrès de la technique, ou du contrôle tant discuté et jamais véritablement mis en œuvre. Seule, l'internationalisation de l'ensemble aurait pu être satisfaisante, car toute solution devra considérer l'arbre tout entier, depuis ses racines de minerais jusqu'à ses fruits de matières fissiles.

Avant même que soit admise à l'échelle humaine la révolution de l'atome, déjà la conquête de l'espace la suit, plus étonnante encore avec aussi son double cortège de bien et de mal et l'amplification possible du cauchemar de la guerre anonyme par la menace de satellites télécommandés à tête nucléaire.

Et, tandis que chez les plus grandes puissances le stock des armes atteint pour la première fois de l'histoire militaire du monde la saturation des destructions potentielles,

une à une d'autres nations, lentement mais inévitablement, vont pénétrer dans le Club atomique dont un seul verrou, le désarmement général et nucléaire, pourra d'abord en fermer l'accès et ensuite aboutir à sa liquidation.

L'affaire est capitale, il faut en faire mieux comprendre, et dans leurs justes proportions complexes, les menaces et les impératifs et aussi les bienfaits qui seront la récompense d'une humanité plus raisonnable et plus unifiée qui, devant le défi atomique, aura su se débarrasser du spectre de la guerre.

Il faut s'arrêter sur cette espérance, sans dénouement ni conclusion, tandis que l'aventure atomique se poursuit.

Index des personnes citées.

Chronologie des principaux événements cités.

1934	Janvier	Découverte de la radioactivité artificielle par les Joliot.
	Juin	Publication de Fermi et son équipe sur le bombardement par neutrons de l'uranium.
1936	Mars	Première publication de Hahn, Meitner et Strassmann.
1937	Août	Première publication d'I. Curie et Savitch.
1938	Décembre	Preuve chimique de la fission par Hahn et Strassmann.
1939	Janvier	Preuve physique et découverte de la fission par Frisch (le 15), par Joliot (le 30).
	Mars	Découverte des neutrons secondaires par Halban, Joliot et Kowarski (le 8), par Fermi et Szilard (le 15).
	Mai	Prise de brevets fondamentaux français.
	Août	Lettre d'Einstein à Roosevelt.
	Septembre	Début de la Deuxième Guerre mondiale.
	Octobre	Création du Comité américain de l'uranium.
1940	Mars	Achat français du stock mondial d'eau lourde en Norvège.
	Avril	Création du « Maud Committee » britannique.
	Mai	Isolement aux U. S. A. des premiers microgrammes d'uranium enrichi en 235.
	Juin	Halban et Kowarski rejoignent l'Angleterre avec le stock d'eau lourde.
	Décembre	Halban et Kowarski démontrent la possibilité de réalisation de la réaction en chaîne. Découverte aux U. S. A. du plutonium.

1941	Juillet	Le Comité anglais conclut à la possibilité de faire une bombe atomique.
	Octobre	Création de l'organisation britannique « Directorate of Tube Alloys ».
	Décembre	Décision américaine d'entreprendre l'étude et la fabrication d'armes atomiques. Entrée en guerre des U. S. A.
1942	Avril	Création du « Metallurgical Laboratory » à l'Université de Chicago.
	Août	Isolement à Chicago d'un quart de milligramme de plutonium. Création du « Manhattan District » organisation américaine à direction militaire.
	Octobre	Décision anglo-canadienne d'un effort commun.
	Décembre	Divergence à Chicago de la première pile atomique.
1943	Mars	Interruption de la collaboration anglo-américaine.
	Août	Reprise de la collaboration anglo-américaine décidée à la Conférence de Québec.
1944	Février	Isolement du premier gramme de plutonium.
	Avril	Décision tripartite de construction au Canada d'une grande pile à eau lourde.
1945	Mars	Lettre de Szilard à Roosevelt.
	Avril	Décès de Roosevelt.
	Juin	Décision d'utilisation de la bombe. Rapport Franck.
	Juillet	Essai à Alamagordo de la première bombe (au plutonium). Conférence de Potsdam.
	Août	Destruction d'Hiroshima (le 6). Entrée en guerre de l'U. R. S. S. contre le Japon (le 8). Destruction de Nagasaki (le 9). Capitulation du Japon (le 14). Publication du rapport Smyth (le 16).
	Septembre	Mise en marche de la première pile canadienne.
	Octobre	Ordonnance créant le Commissariat à l'Énergie Atomique français.

	Novembre	Adoption de la politique du secret à la Conférence tripartite de Washington.
	Décembre	Accord américano - anglo - soviétique sur la création à l'O. N. U. d'une Commission internationale de l'Énergie Atomique.
1946	Janvier	Débuts du C. E. A.
	Mars	Arrestation d'Alan Nunn May.
		Affectation au C. E. A. du fort de Châtillon et d'une enclave de la poudrerie du Bouchet.
	Avril	Publication du rapport Lilienthal.
	Juin	Premiers travaux de la Commission de l'O. N. U.
		Présentation du plan Baruch.
	Juin-juillet	Expériences de Bikini.
	Août	Promulgation de la loi Mac-Mahon.
1947	Printemps	Divergence de la première pile soviétique.
	Juillet	Divergence de la première grande pile à eau lourde canadienne.
	Août	Divergence de la première pile britannique.
1948	Avril	Début du blocus de Berlin terminé en mai 1949.
	Novembre	Découverte à La Crouzille du premier gisement français de Pechblende.
	Décembre	Divergence de Zoé, la première pile atomique française.
1949	Août	Première explosion atomique soviétique.
	Novembre	Isolement du premier milligramme de plutonium français.
1950	Janvier	Décision de Truman d'entreprendre l'étude de la bombe H.
		Arrestation de Fuchs.
	Février	Lettre d'Einstein à Truman contre la réalisation de la bombe H.
	Mars	Appel de Stockholm.
	Avril	Révocation de Joliot-Curie.
	Juin	Début de la guerre de Corée terminée en juillet 1953.
	Septembre	Départ de Pontecorvo en U. R. S. S.
1951	Juillet	Divergence près d'Oslo de la pile hollando-norvégienne.

	Décembre	Première production expérimentale d'électricité d'origine nucléaire à Arco (U. S. A.).
1952	Juillet	Adoption du premier plan quinquennal nucléaire français (quarante milliards d'AF.).
	Octobre	Explosion à Montebello (Australie) de la première bombe atomique britannique.
		Divergence de la première pile de Saclay (EL 2).
	Novembre	Première explosion à hydrogène américaine à Eniwetok (Pacifique).
1953	Février	Lancement du *Nautilus*, premier sous-marin nucléaire américain.
		Mise en marche à Arco (U. S. A.) du prototype à terre du moteur du *Nautilus*.
	Juin	Exécution des époux Rosenberg.
	Août	Explosion de la première bombe à hydrogène soviétique.
	Décembre	Abandon anglo-américain de la politique du secret à la Conférence au sommet des Bermudes.
		Discours du Président Eisenhower devant l'Assemblée générale de l'O. N. U.
1954	Mars	Explosion à Bikini d'une bombe H américaine de quatorze mégatonnes avec retombées radioactives sur des pêcheurs japonais.
	Juin	Mise en route en U. R. S. S. de la première centrale nucléaire.
	Août	Modification de la loi Mac-Mahon en faveur de la collaboration internationale dans le domaine pacifique
	Octobre	Conclusion des accords de Paris, comprenant la renonciation allemande aux applications nucléaires militaires.
	Décembre	Décision, non suivie d'effet, prise par Mendès-France, président du Conseil, de fabrication d'une bombe atomique française.
		Mise en service du sous-marin *Nautilus*.
1955	Février	Annonce du programme britannique de deux millions de kilowatts électriques en 1965.
	Mai	Extension du premier plan quinquennal français (à cent milliards d'AF).

		L'Allemagne recouvre sa liberté dans le domaine atomique civil par suite de la mise en vigueur des accords de Paris.
	Juin	Conférence de Messine sur la relance de l'intégration européenne.
	Août	Première Conférence atomique des Nations Unies à Genève.
1956	Janvier	Divergence à Marcoule de la pile G 1.
	Juin	Accord franco-américain portant sur quarante kilos d'uranium 235 pour réacteurs de recherche.
	Juillet	Saisie du canal de Suez par le gouvernement égyptien.
	Octobre	Inauguration de la centrale britannique à double objectif de Calder Hall.
		Adoption à New York, à l'O. N. U., des statuts de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.
1957	Mars	Annonce de la décision de triplement du programme d'électrification nucléaire britannique.
		Échec de la négociation d'achat français d'uranium au Canada.
		Signature à Rome du Traité d'Euratom.
	Mai	Publication du rapport des Sages : « un objectif pour l'Euratom ».
		Explosion de la première bombe H anglaise aux îles Christmas.
	Juin	Extension de l'accord franco-américain aux réacteurs de puissance et à deux mille cinq cents kilos d'uranium 235.
	Juillet	Ratification parlementaire française du Traité de l'Euratom et des statuts de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.
		Adoption du deuxième plan quinquennal nucléaire français (cinq cent milliards d'AF).
	Octobre	Lancement du premier *Spoutnik* soviétique.
		Incendie de la pile de Windscale.
		Entrée en vigueur de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.
	Décembre	Offre du Président Eisenhower sur le sous-marin nucléaire aux puissances de l'O. T. A. N.

		Mise en marche à Shippingport de la première centrale américaine.
1958	Janvier	Entrée en vigueur de l'Euratom.
	Février	Entrée en vigueur de l'Agence Européenne de l'Énergie Nucléaire.
	Avril	Production par G 1, à Marcoule, des premiers kilowatts électriques nucléaires français.
	Juillet	Modification de la loi Mac-Mahon en faveur de collaborations internationales dans le domaine militaire.
		Accord anglo-américain sur les armes et le sous-marin nucléaires.
		Divergence à Marcoule du réacteur G 2.
		Conférence à huit nations sur la détection des explosions atomiques.
	Août	Traversée sous-marine de la calotte polaire nord par le *Nautilus*.
	Septembre	Deuxième Conférence atomique de Genève.
		Mise en marche en Sibérie d'une centrale à double objectif de cent mille kilowatts électriques.
	Octobre	Décision américano-anglo-soviétique de suspension des explosions nucléaires.
		Début de la Conférence tripartite sur cette suspension.
	Novembre	Signature de l'accord Euratom-U. S. A.
1959	Mars	Accord franco-américain sur quatre cent quarante kilos d'uranium 235 pour un prototype à terre de moteur de sous-marin.
	Mai	Accord d'échange anglo-américain plutonium-uranium 235.
	Juin	Divergence à Marcoule du réacteur G 3.
	Septembre	Premiers essais du *Lénine*, brise-glace nucléaire soviétique.
	Novembre	Décision américaine de non-reconduction du contrat d'achat d'uranium canadien.
	Décembre	Mise en service du premier sous-marin *polaris* américain.
		Résolution de l'Assemblée générale de l'O. N. U. demandant à la France de ne pas procéder à des explosions nucléaires.

1960	Février	Première explosion nucléaire française à Reggann (deuxième en avril; troisième en décembre; quatrième en avril 1961).
	Avril	Signature d'un accord nucléaire franco-soviétique.
	Juin	Marche en puissance de la centrale américaine de Dresden.
	Décembre	Adoption de la loi programme française sur la force de frappe.
1961	Janvier	Marche en puissance de la centrale américaine yankee.
	Avril	Abandon du programme américain d'aviation nucléaire.
	Septembre	Reprise des explosions nucléaires soviétiques aériennes, suivie après quinze jours par la reprise des explosions souterraines américaines.
	Octobre	Explosion d'une bombe soviétique de soixante mille tonnes.
	Décembre	Lancement du vingt-huitième sous-marin nucléaire américain.
1962	Janvier	Ajournement *sine die* de la Conférence tripartite de Genève sur l'arrêt des explosions nucléaires.
	Mars	Premiers Essais du *Savannah* navire marchand nucléaire américain.
		Plébiscite Suisse rejetant une proposition de renonciation à l'arme atomique.

Liste des ministres français chargés de l'énergie atomique.

(Dans tous les autres gouvernements, le Président du Conseil lui-même en était responsable.)

Novembre 1947-juillet 1948. Pierre Abelin (gouvernement Robert Schuman).
Août 1951-janvier 1952. Félix Gaillard (gouvernement René Pleven).
Janvier 1952-mars 1952. Félix Gaillard (gouvernement Edgar Faure).
Mars 1952-janvier 1953. Félix Gaillard (gouvernement Antoine Pinay).
Janvier 1953-juin 1953. Félix Gaillard (gouvernement René Mayer).
Juin 1953-juin 1954. Pierre July (gouvernement Joseph Laniel).
Juin 1954-février 1955. Henri Longchambon (gouvernement Pierre Mendès-France).
Février 1955-octobre 1955. Gaston Palewski (gouvernement Edgar Faure).
Octobre 1955-février 1956. Pierre July (gouvernement Edgar Faure).
Février 1956-juin 1957. Georges Guille (gouvernement Guy Mollet).
Juin 1957-novembre 1957. François Bénard (gouvernement Maurice Bourgès-Maunoury).
Janvier 1959-février 1960. Jacques Soustelle (gouvernement Michel Debré).
Depuis mars 1960. Pierre Guillaumat (gouvernement Michel Debré).

Table des matières.

Achevé d'imprimer le 12 avril 1962
dans les ateliers de l'Imprimerie Floch à Mayenne (France),
pour le compte de la Librairie Arthème Fayard,
18, rue du Saint-Gothard, Paris 14.

Maquettes de Jeanine Fricker.

Dépôt légal n° 2.873 (5203) 2e trimestre 1962